

090.8-131

明治大学科学技術研究所報告

総 合 研 究

第 36 号

肥料三要素の連続施用が作物生育環境および
土壤環境に及ぼす影響

江 崎 要

内 藤 忠 雄

箱 崎 美 義

山 下 義 幸

竹 迫 紘

中 林 和 重

肥料三要素の連続施用が作物生育環境および 土壌環境に及ぼす影響

江 崎 要
内 藤 忠 雄
箱 崎 美 義
山 下 義 幸
竹 迫 紘
中 林 和 重

Influence of Long-term Application of Three Major Nutrients on Crop Growth and Soil Environment

Kaname EZAKI
Tadao NAITO
Miyoshi HAKOZAKI
Yoshiyuki YAMASHITA
Hiroshi TAKESAKO
Kazushige NAKABAYASHI

*The Institute of Science and Technology, Meiji University
1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa-ken, 214-8571*

目 次

まえがき

1. 黒ボク土畑地の表土厚さが土中水分の変動に及ぼす影響
—肥料三要素連続施用圃場試験区における調査・試験・研究(1)—(1)
2. 数種の施肥連用と2種の作物連作による土層の硬さについて
—肥料三要素連続施用圃場試験区における調査・試験・研究—(10)
3. 化学肥料の長期運用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響(20)
4. トウモロコシの磷酸欠乏条件における特異的発現遺伝子に関する研究(41)
5. 肥料三要素を連続施用したほ場におけるダイズおよびトウモロコシの無機成分の吸収(49)
6. 肥料三要素の連続施用が大豆の収量および成分におよぼす影響(59)
7. 化学肥料3要素の連続施用が連作エダマメの生育および収量に及ぼす影響(71)

総合研究をかえりみて

まえがき

近年の日本農業、とくに終戦の昭和20年（1945）以後は、かなり大きな変貌を見せる歴史的過程として把握できそうである。その変化の大きな契機になったものとして、終戦後まもなく実施された農地改革、昭和36年（1961）に制定された農業基本法、昭和45年（1970）ころに始まるコメの余剰傾向と昭和55年（1980）から国の政策として本格的に始動するコメの生産調整（減反）、ごく最近のいわゆる新農業基本法の施行などが挙げられよう。

これらは戦後の日本経済発展の歴史に深い関わり合いを持つようである。

とくに昭和30年代後半からの高度経済成長は、日本の大都市圏と農村地域との経済格差を拡大し、深刻なものにして行くだらうという政策的認識から、農業基本法が制定された。この農業政策の究極的目標は、農業の生産性向上と、農業従事者の所得の増大であった。この「生産性向上」という思潮の流れは、日本農業の経営の実態を大きく変貌させた。すなわちこれを境に畜力耕からトラクター・コンバインなどの大型機械化農業に変化させて行く。これを実現させるために、1枚1枚の田・畑を大型機械が稼働できるような大きな圃場に再編・整備する農業構造改善一圃場整備事業一が全国的な進展を見せて行った。

畜力耕の事実上の消滅は、堆肥などの有機質肥料の投与を困難にさせ、化学肥料に頼る農業に変質させて行った。このような農業は「地力」の低下をもたらす上に、農業施用も増大させ、全国的な農業問題の重要課題の一つとなった。

このような時代的な問題も背景にして、全国の各農業試験場や農学部をもつ大学などの試験研究機関においては、同一試験区に同一施肥を長年月連用しながら作物を栽培し、長期的な変化の観測調査や研究が多くなされている。

明治大学農学部では、生田校舎南圃場において肥料三要素の連続施用試験圃場が設定された。肥料としては化学肥料だけに限定して、肥料三要素と呼ばれる窒素（N）、リン酸（ P_2O_5 ）、カリ（ K_2O ）について、その1種類または2～3種類の組み合わせの中から、数種類の施肥を選定した。また作物はエダマメとトウモロコシを選定して、同一試験プロット区には、施肥の種類と施用量さらに作物を毎年変えずに固定して栽培する、長期連続栽培試験が開始された。

肥料三要素連続施用試験は、昭和49年（1974）から農学科の植物生産実習として、継続的に運営・管理されてきた。ところがカリキュラム改訂により、ある年度をもって授業科目としての植物生産実習が終了することになった。

そこでこの肥料三要素連続施用試験の継続を中心に協議した結果、施肥の種類によって作物の生育状況などにかかなり明瞭な差（目視による）が認められる状況が生じており、20年以上も忍耐強く継続した貴重な試験圃場なので、「研究」としてその実績評価をなすべきだという強い意向が確認された。

このような経過で、本学科学技術研究所の総合研究に申請し採択された。

この総合研究は、植物生産実習との関連も考慮して、本学農学部の専任教員教員6名で実施した。総合研究の研究期間が終了して2年が経過し、学術誌への発表も終えたので、得られた研究成果を報告する。

黒ボク土畑地の表土厚さが土中水分の変動に及ぼす影響

—肥料三要素連続施用圃場試験区における調査・試験・研究(Ⅰ)—

江崎 要* 中矢哲郎** 高橋佳孝*** 柳澤 剛****

*明治大学農学部, 〒214-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1.

**農林水産省農業工学研究所, 〒305-8609 つくば市観音台 2-1-2.

***自営, 〒923-1101 石川県能美郡寺井町粟生イ57.

****明治大学大学院農学研究科, 〒214-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1.

要 旨

黒ボク土の畑地土層は、表土層と下層土に大きく分けられる。表土層と下層土の土壌物理性はかなり異なる。

本報では、黒ボク土の表土層の厚さの違いが、深さ方向に、層別の土中水分の変動および土壌水分消費量に影響を与えていることを、論証した。

とくに比較的深い土層における土中水分の変動に注目し、地表から深さ170cmまでを検討の対象とした。黒ボク土の表土の厚さがかなり異なる2つの試験区を比較対照的に検討した。この結果、表土層(A層)と下層土(B層)の境界の深さの相違によって、水分移動や水分消費の様子がかなり異なることを明らかにした。

本報は明治大学生田校舎の肥料三要素連続施用試験圃場で得られた研究成果で、関東ローム層である。

キ ー ワ ー ド : 水分移動, 保水性, 水分張力, 土壌水分消費量, 関東ローム

1. はじめに

明治大学農学部が所在する生田校舎の南圃場に、窒素、リン酸、カリウムの肥料三要素連続施用栽培試験を、昭和49年(1974年)以後20数年間にわたって、毎年継続している圃場試験区がある。

供試作物は、エダマメとトウモロコシである。

化学肥料の三要素(N,P,K)を、単独または複数組み合わせた肥料として、長期間継続的に栽培された。エダマメ区は無肥1種類、施肥7種類で3反復、トウモロコシ区は施肥4種類6反復で、各々24試験区、全体で48試験区から構成されている。また各試験区の配置は完全乱塊法で定められた。

本報の内容は肥料三要素の及ぼした影響について直接評価するものではないが、この目的の一環として、圃場試験区においてテンシオメータによる土中水分の観測を続け、その解析を行ったところ、A層(本報では黒ボク土の表土層、黒みの強い層位を意味する。褐色の下層土との境界は明瞭である)の厚さの相違によって、深さ方向に、土中水分の変動の様子が異なり、土壌水分消費のメカニズムにも影響を与えているようだということが、論議・論証しながら報告する。

なお、この圃場試験区は関東ロームの立川ローム層である(山崎不二夫らのグループによる関東ロームに関する

総合的研究の一環として、隣接地の三田団地宅地造成時における、山崎・竹中(1965)の調査試験研究例がある)。また生田校舎南圃場全体としては、畑地圃場を使い易くするために地表面の整地がなされた程度で、大がかりな切盛を伴うような土工は実施された形跡はない。とくにこの肥料三要素試験圃場造成時の土移動は必要最小限に止めているので、下層土も重視した土層全体として見ると、自然の状態が比較的良く維持されている土層と考えられる。

2. 調査試験方法と対比試験区の選定

土中水分の変動状況の調査は、日に1回テンシオメータの経日的定時観測の継続によった。時刻は12時過ぎである。自記雨量計による降雨量、小型蒸発計による蒸発量の測定を併せ実施した。

観測は調査開始以来3カ年、例年ほぼ決まった期間に実施している。肥料三要素連続施用栽培試験の作付け期間内である5月下旬から8月上旬までと、10月を中心とした約1カ月間である。土壌水分消費は、前者は畑状態における蒸発散量が中心になるが、後者の10月は無作付け状態となるので、土壌面蒸発量である。

テンシオメータの設置深度は、比較的深い下層の土中水分変動を知るために、一般的な組み合わせの深さ、5,15,



Fig.1 圃場試験区の概要とテンシオメータの設置状況 (1997 年)

The outline of the test field and the arrangement of tensiometer (1997)

25,35,45,60cmに加えて,試験区によっては80,100,120,140,160cmを,さらに2試験区では180,200cmを追加的に設置した. Fig.1に圃場試験区の概要とテンシオメータの設置状況(1997年の配置で,年ごとに若干の変更をする)を示した.

1試験区の大きさは,エダマメ区が約1.7×5.0m,トウモロコシ区が約2.1×5.0mである.

テンシオメータはDIK-3100(大起理化工業)を使用した.本器は気泡対策として,器体の最上部にエアブール(円筒状容器)を設け,発生した気泡を誘導的に上昇・移動させ,エアブールに集めるという構造的な工夫をしている.管理は比較的容易である.各試験区には長辺方向に3列の作条があるが,圃場外から観測し易いように,テンシオメータ受感部は圃場外から近い1列目と2列目の作条の中央に埋設し,テンシオメータ本体の観測板は1列目作条の外側ほぼ30cm位のところに設置した.テンシオメータ受感部の深度が大きくなると,所定のテンシオメータ用オーガを使用しても,穴の大きさと受感部アクリル管の間に若干の隙間が出来て,密着性に問題が生じてくる.そこで受感部アクリル管を所定の深さにセットする際に,黒ボク土表土と水道水で薄めの泥水を作って,穴と受感部アクリル管の隙間に泥水を注入することにした.土層全体の透水性は良いので,泥水の水は浸透し泥だけが残留沈積して,ポーラスカップの周辺土層との密着性を良くする.泥水の注入は,水の浸透を待ちながら何回も繰り返して,土が地表面に達するまで続け,隙間を埋める.この調査・研究では,テンシオメータ受感部が深い・浅いにかかわらず,このような作業を全てについて実施した.

圃場試験区は全体的にはほぼ一様に南から北方向に緩やかに傾斜していて,その平均的勾配は約9%である.

圃場試験区は毎年常用型トラクターによるロータリー耕が15~20cmの深さで実施されているが,これによる耕盤の形成らしき影響は認められなかった.

検土杖による簡易土壌断面調査によって,各試験区ご

との表土層厚さの傾向性については,中矢(1998)らの調査・研究により,ある程度概略的なことは把握できているので,A層厚さの異なる試験区46(NPK)と試験区44(PK),及び試験区25(PK)を比較試験区とした.以上の3試験区はいずれもトウモロコシ栽培区である.なお試験区46と試験区44とでは,施肥の種類が異なっているが,本報では表土層・下層土という対照的な大きな捉え方をしているので,表土層という大きな枠組みの中では,土壌物理性に関しては,マクロ的には両試験区とも似たような性質のものに属するという考え方をとっている.検土杖による試料採取時の貫入抵抗やその土試料の目視等では,施肥の種類が異なっているが,同じ作目のトウモロコシ栽培下であれば,土壌物理性に関しては定性的傾向として特別に大きな相違は感じられなかった.

毎年の耕耘が,表土層厚の違いとくに表土層が薄い場合には,耐水性団粒の形成や消長にかなりの影響を及ぼすのではないかと懸念もあるが,西村・江崎(1995)の作土層に対する耐水性団粒の試験結果(深さ3~8cmに統一して採土した)では,エダマメとトウモロコシとの作物間ではかなりの差が認められるが,同一作物の試験区間においては,比較的差は小さかった.

Fig.2に,長谷川式土壌貫入計による土層の硬さと検土杖による成層状況の調査を行った結果を示した.土色はマンセルの標準土色帳によった.放任区の表土層の厚さと比較すると,3試験区の表土層の厚さは,試験区25がほぼ同じで,試験区44および46はかなり厚い.

Fig.2の土層の硬さは,1cm貫入するのに必要とした打撃回数で図示している.これを表土層と下層土に分けて検討してみることにした.

表土層の1cm貫入平均打撃回数と標準偏差は放任区が 0.67 ± 0.33 ($n=27$),試験区25は 0.50 ± 0.17 ($n=25$),試験区44は 0.64 ± 0.23 ($n=79$),試験区46は 0.62 ± 0.06 ($n=100$)であった.検定してみる(5%有意水準)と,放任区と表土層が比較的薄い試験区25とでは有意差があったが,放任区と表土層が比較的厚い試験区44および46との間では有意差

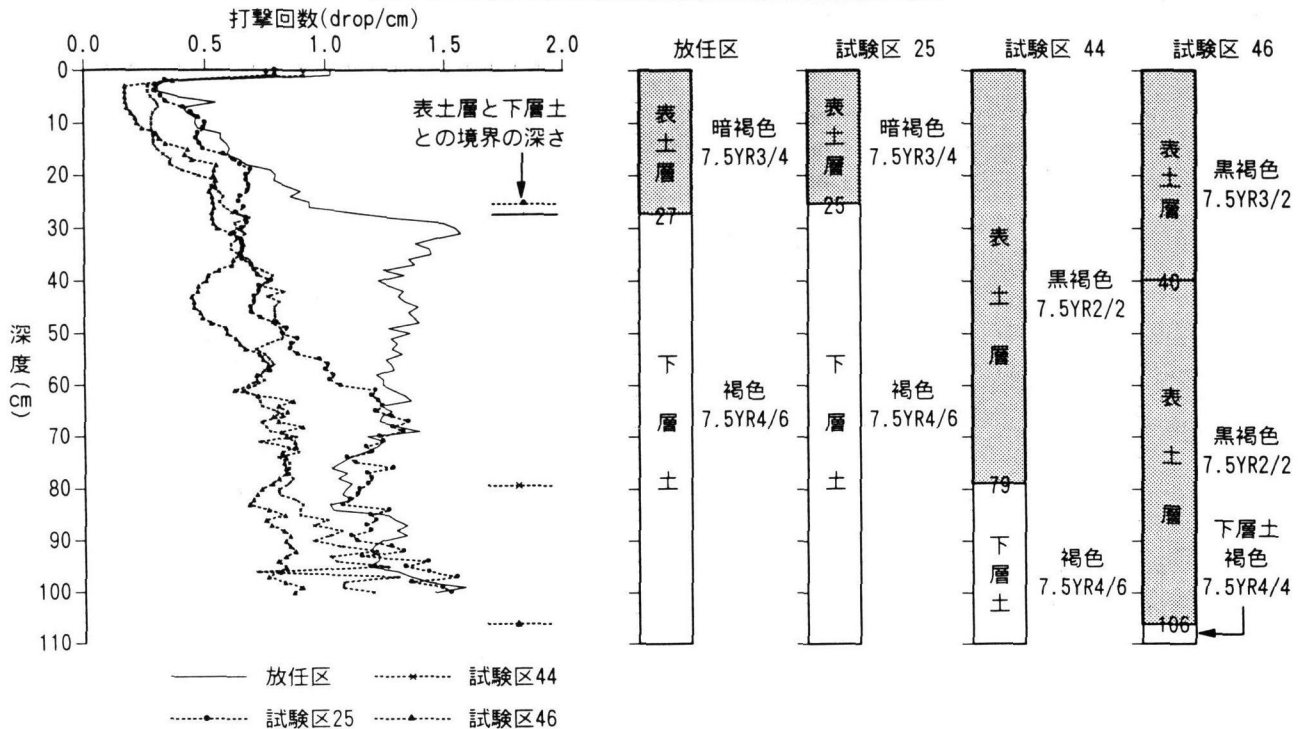


Fig.2 各試験区の長谷川式土壌貫入計による土壌の硬さ

The hardness of soil layers by Hasegawa type soil interpenetration-meter in each test plots

はなかった。なお、試験区25と試験区44および46との間には有意差があった。

同様に下層土の1cm貫入平均打撃回数と標準偏差は放任区が 1.27 ± 0.30 ($n=73$)、試験区25は 1.01 ± 0.37 ($n=75$)、試験区44は 1.01 ± 0.38 ($n=21$)であった。t検定してみる(5%有意水準)と、放任区と試験区25および44の間では有意差があった。しかし試験区25と試験区44の間には有意差はなかった。

放任区と3試験区との間にはかなりの差違があるように見えるが、統計的検討の結果からは、本報で特に問題にしているA層(表土層)の範囲内に限定すると、土層の硬さに差があるとは言えないことになる。

B層(下層土)については、Fig.2から深度25~50cmの土層の硬さ(打撃回数)を見ると、3試験区の差はそれ程大きくはないが、試験区25は下層土であり、試験区44と46は表土層で、明らかに性格の異なる土層である。試験区25の下層土は、深度25~50cmについては表層土と似たような土層の硬さを示していて、深度約50cmから土層の硬さが増加して行き、ほぼ60cmを超してから下層土の本来の硬さになっているようである。試験区25の深さ方向のこのような土層の硬さの変化は、トウモロコシの根の作用・影響と考えるのが自然であろう。戸澤英男(1981)は著書の中で、イネ科作物全体は比較的浅根性であるとされ、トウモロコシでも比較的浅い層に分布するが、層別の根群分布は、条件によって異なるけれどもかなりの根は1m前後の深層に伸びる。また深層に達した根は有機物源としてだけでなく土層を改良すると述べている。

したがって、根の問題を軽視することはできない。

以上のように、圃場調査ゆえの条件の不均一性は懸念されるが、本報は、表土層・下層土という土壤物理性かなり異なった2層からなる成層構造に着目しており、さらに表土層の厚さの相違が、土壌水分の変動特性と土壌水分消費のメカニズムに、かなり大きな影響を及ぼすのでないかということ、マクロ的観点から解析しようという狙いがあるので、上記のような割り切った考え方をした。

なお、同じ圃場試験区にあるのに、個別の各試験区によって何故表土層の厚さが大きく異なるのか、明確な理由は現時点では解明されていないが、本学の古きを知る共同研究者の中には土壌侵食の可能性を強く指摘する意見も強い。圃場試験区に全体的な傾斜があること、高さが最も低い北側の試験区43~48の列の表土層厚さが最も大きいことを考慮すると、長期間にわたる土壌侵食の集積結果だという可能性は否定し難いものがある。

3. 調査試験結果と考察

3.1 表土層厚さの違いによる土中水分変動状況

1996年のテンシオメータの連続経日定時観測から、試験区46について、作付け期間内の6月4日から7月30日までの土中水分変動状況を示したのが、Fig.3とFig.4である。Fig.3は深さ15~80cm、Fig.4は80~160cmを図示している。

試験区46は検土杖調査によると、深さ0~80cmまでは

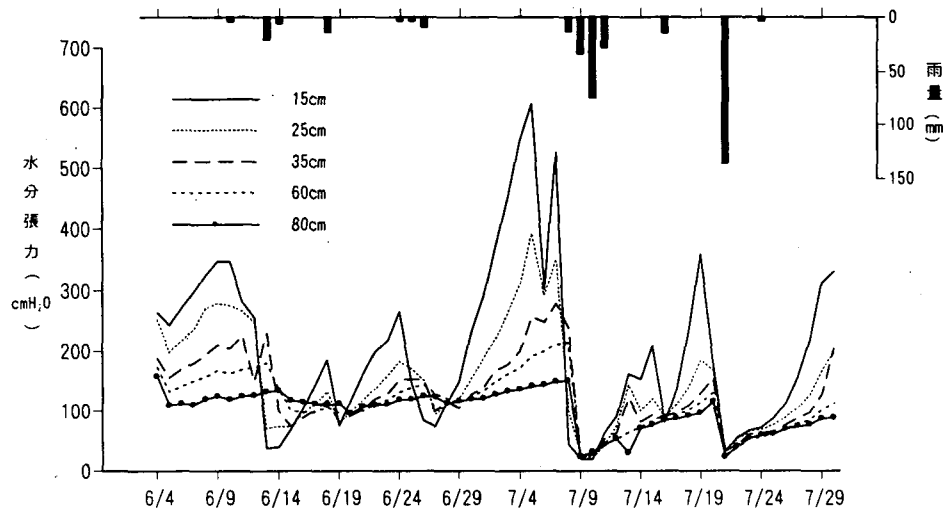


Fig.3 土中水分の変動と降雨 (深さ0~80cm・表土層) (1996年6月4日~7月30日, 試験区46)

The variation of soil moisture and rainfall (depth 0~80cm・surface soil layer) (June 4th ~ July 30th 1996, Test plot 46)

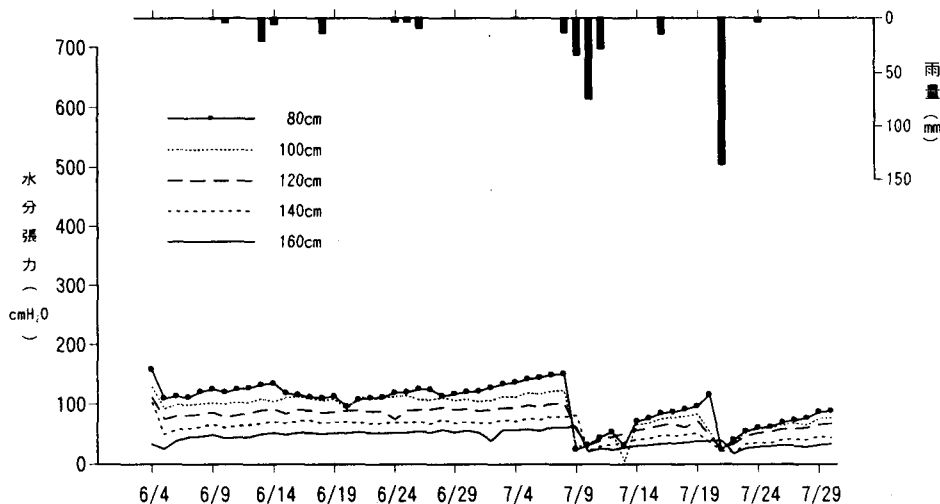


Fig.4 土中水分の変動と降雨 (深さ80~160cm・下層土) (1996年6月4日~7月30日, 試験区46)

The variation of soil moisture and rainfall (depth 80~160cm・subsoil layer) (June 4th ~ July 30th 1996, Test plot 46)

黒ボク土表土層(A層)であり,96cm以深は黒ボク土下層土(B層)であった.80~96cmまでの土層は,表土層・下層土のいずれか判別し難かった.

なおFig.2によると,試験区46の黒ボク土表土層と下層土の境は106cmとなっていて数字がやや異なるが,同一の試験区内でも調査地点が少し離れると黒ボク土表土層の厚さが異なることがあること,また表土層厚が深くなると,表土層・下層土の判別がやや困難になることなどが影響したものと考えられる.

Fig.3は黒ボク土表土層内の深さ別の水分張力の推移を,またFig.4は黒ボク土下層土の比較的深い土層の水分張力の推移を示している.

観測期間は梅雨の時期をはさむが,Fig.3からは,深さ15cmでは,無降雨の干天が続く(7月5日頃)と水分張力の増加は大きく,土壌は乾燥する.かなり多量の降雨時(7

月9日頃)には,水分張力の低下が顕著で土壌水分の保留に伴う土壌の湿潤化の程度が大きい.

深さ25cmもこれに次いで土中水分の変動が大きい.

表土層の低位に位置する80cmでは,降雨が比較的少ない時期では,水分張力100cmH₂O程度で安定的に推移しており,20mm/d程度の降雨では,水分張力の低下は殆ど見られない.しかし,100mm級の多量の降雨では,水分張力は大きく低下する.

深さ80cmの土中水分は,表土層の浅い位置のそれと比較すると,変動幅はかなり小さい.

Fig.4によると,80cm以深は,降雨が比較的少ない時期では,ほぼ安定的な値を示している.そして特徴的なことは,この一定の水分張力の値が深さの増加とともに,順序良くほぼ比例的に低くなることである.

この安定的に推移する土中水分の大まかな値として,

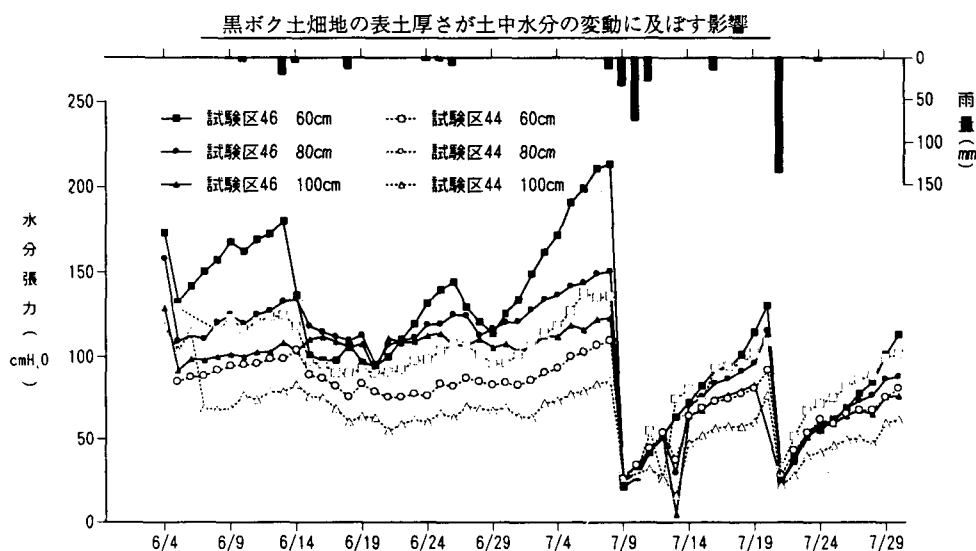


Fig.5 試験区 44 と試験区 46 の水分張力の比較(深さ 60~100cm, 1996 年 6 月 4 日~7 月 30 日)
Comparison of soil moisture suction between plot 44 and plot 46 (Depth 60 ~ 100cm, June 4th ~ July 30th 1996)

6月5日から7月8日までの平均値を算出してみると、深さ 80cm で水分張力 $122\text{cmH}_2\text{O}$ 、深さ 100cm で水分張力 $107\text{cmH}_2\text{O}$ 、深さ 120cm で水分張力 $86\text{cmH}_2\text{O}$ 、深さ 140cm で水分張力 $68\text{cmH}_2\text{O}$ 、深さ 160cm で水分張力 $50\text{cmH}_2\text{O}$ 、であった。

以上のように黒ボク土下層土の比較的深い層において、安定的に推移する土中水分の大まかな値は、 $50\text{cmH}_2\text{O}$ から $120\text{cmH}_2\text{O}$ 程度であった。

ただし、100mm 級もしくはそれ以上の降雨があると、黒ボク土下層土の水分張力は大きく低下する。また上記のような深度に対応した順位規則的なものが崩れて、ほぼ一定の水分張力の値に収れんするような傾向性が見られる。例えば、大降雨後に水分張力が最も低下した 7 月 10 日は、深さ 80~160cm まで、水分張力の値は $20\sim33\text{cmH}_2\text{O}$ 、また同様に 7 月 22 日は、水分張力の値は $18\sim40\text{cmH}_2\text{O}$ であった。一般に圃場容水量(24 時間容水量)は $31.6\text{cmH}_2\text{O}$ から $100\text{cmH}_2\text{O}$ とされているが、100mm 級の降雨直後は圃場容水量の下限 $31.6\text{cmH}_2\text{O}$ か、若干それを下回っている。

吉良ら(1963)は、北関東ローム(宇大)および南関東ローム(農大, 用賀)において、土中水分の周年観測を実施、報告している。この中でとくに北関東ロームにおける水分張力の変動は、黒ボク土の表土層ではかなり激しくまた大きい、黒ボク土の下層土では深くなるにしたがって変化の割合が小さくなること、冬から夏まで四季にまたがる周年調査、コムギ・陸稲の作付け体系などの違いはあるが、黒ボク土下層土の土中水分は、蒸散作用が激しい時期を除けば、 $100\text{cmH}_2\text{O}$ 前後を中心にその近くで推移している様子や、水分張力の降雨に対する反応など、全般的に吉良らの報告内容と矛盾するようなところはない。筆者らの調査が期間限定的なのに対して、吉良らの調査は周年調査なのでより多面的な性格を持っているという見方もできる。

Fig.5 は試験区 46 と試験区 44 の両者について、黒ボク土の表土層から下層土への移り変わり付近の土層について、土中水分の変動状況を示したものである。図示している期間は Fig.3 および Fig.4 と同一である。

試験区 44 は 0~60cm が黒ボク土の表土層、60cm 以深は下層土であり、両者の境界は比較的明瞭である。

試験区 44 の表土層は 60cm、表土層が 80cm の試験区 46 よりも表土層厚が小さい。それ故に、Fig.5 に示されているように、60, 80, 100cm の各々の同一深度について両試験区の土中水分を比較すると、下層土(B 層)の性格が強い試験区 44 の方が水分張力は全般的に低い値になっている。また土層が表土層から下層土に変化していく境界部(試験区 44 の 60cm~80cm、試験区 46 の 80cm~100cm)から、試験区 44 の 60cm と試験区 46 の 80cm における水分張力の両者を比較すると、両者の経日の変化は比較的パラレルな動きを示し、その差も比較的小さいことが読みとれよう。

表土層から下層土への変化、とくにその境界面が、土壌水分の垂直方向の水分移動、とくに毛管上昇などになり大きな影響力を持っていることが推定される。

3.2 連続干天期における土中水分の変化

肥料三要素圃場試験区の作物は、4 月下旬に播種、7 月下旬から 8 月初めに収穫され、その後は無作付け状態で放置されるのが、例年のパターンである。1997 年の秋は異常気象とも言えそうな長期間の連続干天があった。10 月 4 日に 10mm、10 月 5 日に 9mm の降雨以後は、11 月 14 日の 11mm の降雨まで、約 40 日間の無降雨日が続いた。

圃場試験区から、同じ作物のトウモロコシ、同じ施肥(種類、量とも)の PK 区で、表土厚さが約 60cm の試験区 44 と表土厚さが約 20cm の試験区 25 を選定して、連続干天期における土中水分の変化の様子を追跡した。この場合の土壌水分消費は土壌面蒸発が主体となる。圃場試験区は

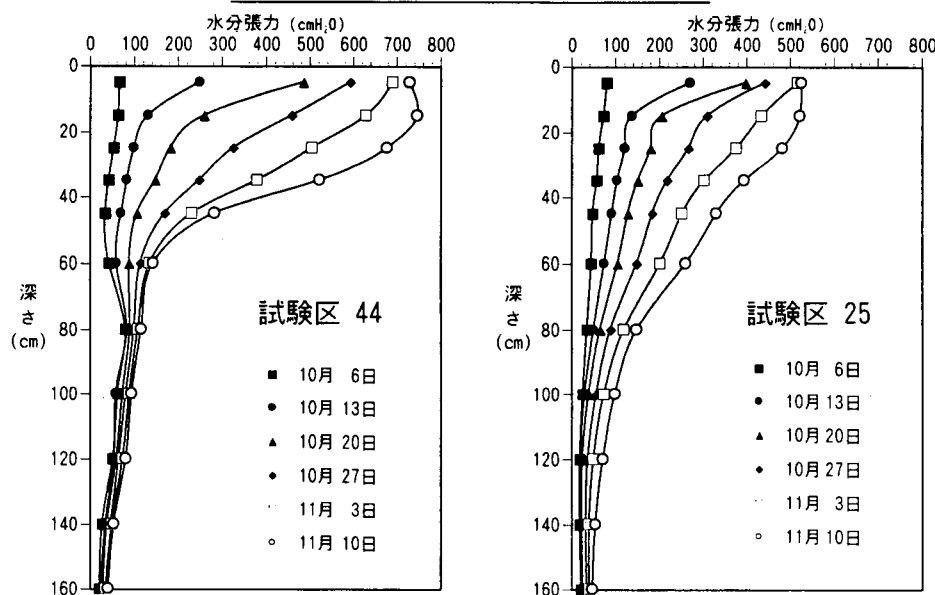


Fig.6 連続干天期における水分張力の変化(1997年10月6日～11月10日, 1週間ごと)

Changes of soil moisture suction in the term of continuous fine days (October 6th ~ November 10th 1997, At intervals of one week)

除草中耕などの畝間管理を行うが、テンシオメータの受感部周辺もこれと同じような状態を維持するよう努めた。Fig.6はほぼ24時間容水量と考えられる10月6日を始点として無降雨日が続く11月10日までの水分張力の変化を示したものである。

Fig.6の図中では、7日ごとの水分張力の漸増的变化の模様を示している。試験区44と試験区25を比較すると、両者の乾燥進行過程はかなり異なっていることが読みとれよう。

試験区44では、表土層の層位内で深さ40cmぐらいまでの比較的浅い層における土中水分の変動が激しく、土壌の乾燥が非常に進んでいる。これに対して、下層土の深さ80cm以深は比較的低い水分張力の値で、しかも変化幅が小さく安定的に推移している。試験区44は比較的厚く形成された表土層内における土壌水分の変動が主で、下層土の土層全体の土壌水分変動に対する関与、影響力は比較的小さいと判断される。

試験区25はこれと逆の傾向性にあると言えよう。

この両者の違いは表土厚さの相違に起因すると考えられる。黒ボク土表土層の保水性の良さ(団粒構造が発達し有効水分量が多い)から、土壌面蒸発による土壌水分消費は黒ボク土表土層の浅い部位から始まって、次第に表土層の深い部位に移行していく。そしてある程度の乾燥状態に達すると、黒ボク土下層土(B層)からの毛管上昇による土壌水分補給が機能し始める。この時、黒ボク土の表土層厚が数十cmにもなるとかなり大きな場合には、その層が持つ生長有効水分量RAMのトータル量が非常に大きなものになるので、かなり長期間の干天が続いたとしても、その際の土壌水分消費量は表土層(A層)内に存在するRAMで供給できるので、実質的に下層土からの毛管水分補給をあまり必要としないで済んで

しまう。

このように考えると、Fig.6の両試験区の土中水分変動状況の違いが説明できるように思われる。

本報では黒ボク土下層土のことを、便宜的な意味合いが強いが単純にB層と称している。しかしこのB層という呼び方には若干問題がある。この方面の分野の専門家は、このB層を2つに分けて、上部の比較的土壌硬度の値が低い部位(A層との境界のすぐ下に位置することが多い)をソフトローム、土壌硬度の値が高くなった部位以下をハードロームと称している。一例として関東ローム研究グループ(1965)による研究成果がある。

土壌断面の表示ではソフトロームをB層、ハードロームをC層と区別することが多いようである。土色の点では、両者に微妙な違いは存在するが、専門家は別として、一般的には両者の間に顕著な差はないと言っても差し支えないであろう。

このソフトローム「B層」の形成は、大降雨とその後の連続干天が長年に亘って繰り返すことによって、黒ボク土下層土の最も上位にあたる層が、土壌水分の増減を繰り返し、ソフトローム化したと考えられている。

本報の圃場試験区一帯は、ソフトロームが薄く存在し、その厚さは10cm程度以下の場合が多いようである。

このソフトロームは、乾湿の繰り返しによって土壌構造に若干の乱れが生じていることを意味するので、A層の層厚が大きい場合には、ソフトロームの存在が土壌水分の毛管移動、とくに土壌水分の毛管上昇に対しては、これを阻害するような方向で作用する可能性が高い。

なお、表土層(A層)の厚さについて、試験区44は60cm、試験区46は80cmとして論述してきた。また試験区25は約20cmとした。これらの数値はFig.2に図示されている数字とは若干異なる値である。この理由はFig.2の数字が試

験区中央の長辺方向3カ所を選定して測定した平均値であるのに対して、60,80cmの数値は、テンシオメータ設置地点で測定したものである。測定地点が約1m以上離れているので、両者の数値にずれが生じたと考えられる。

3.3 連続干天期における土壌水分消費量

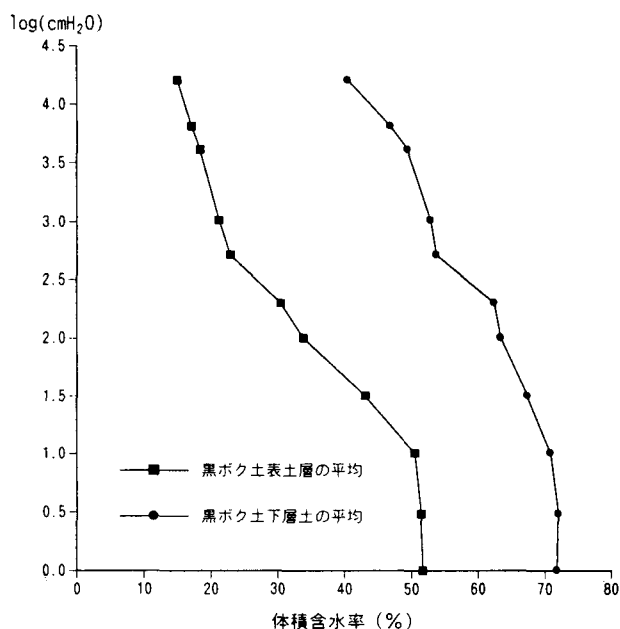


Fig.7 圃場試験区に隣接した自然放任区における土壌水分特性曲線
Soil moisture characteristic curve in the controlled test plot maintained natural condition, being adjacent to the test field

畑地灌漑計画で有効土層厚(40~50cm程度が一般的)への土壌水分の毛管上昇補給量が問題となっており、これに対する知見も報告されている。例えば千家正照(1992)や、河野広(1988)が分担執筆した著書がある。

本節の検討では、後述のように水分消費量の計算に推定が入っていて精度に若干問題がある。したがって非常に長い連続無降雨期間において、地表面から170cmまで黒ボク土の表土層と下層土を含めたかなり大きな土層厚を対象に、土壌水分消費に関してマクロ的な定性的傾向を把握することを目的にする。

そこで、表土層、下層土を更に細分化した層別に分け、また連続干天期を7日間ごとに分けて、土壌水分消費量の検討を行うことにした。

本学の総合研究として他分野の研究者を含めた共同研究が進行中なので、試験区を直接掘り起こして行う土壌断面調査は当面不可能である。作物栽培試験などに影響を与える恐れが強いからである。そこで、圃場試験区に隣接した自然放任地(雑草と竹などが自生)で、試験残土や草刈りの土捨て場用として掘削された穴を利用して、土試料の採取を行った。この穴は圃場試験区からは約10m離れた位置にあり、土層の層序は圃場試験区とほぼ同様である。畑状態と自然状態の違いはあるが、土壌

の物理性はマクロ的観点からは似たような性格を持つものと判断した。そこで穴の側壁を約60cm削りとり、新鮮な断面を出して、100mlの採土円筒によって黒ボク土の表土層から3深度(5,20,30cm)、下層土から3深度(40,60,100cm)について不攪乱試料を採取した。

これらの試料の室内試験から、土壌水分特性曲線を求めた。これがFig.7であるが、表土層・下層土ともに、各々3深度の平均を示した。試験区が直接掘れないための代替的な処置なので、表土と下層土と大きな仕分けをして、多くのサンプルの平均値で代用することにした。試験区の土壌水分消費量について大まかな傾向性を探るための推定計算という意味では、ある程度の有効性は持つであろうと判断した。

Fig.5に示された試験区44と試験区25について、7日おきの水分張力の変化に合わせ、これをlog(cmH₂O)に換算し、Fig.7の土壌水分特性曲線を用いて、土壌水分消費量を計算した。具体的な土壌水分消費量の計算は、表土層、下層土を細分化して、深さ170cmまでの土層全体を、表土層・下層土の境界やテンシオメータの設置深度などを考慮して、5つの層に分割して行った。

両試験区とも層の区分は同様にした。第1層は0~20cm(層厚20cm)、第2層は20~52.5cm(層厚32.5cm)、第3層は52.5~90cm(層厚37.5cm)、第4層は90~130cm(層厚40cm)、第5層は130~170cm(層厚40cm)である。

Fig.8は5つの層別に、連続干天期における7日間単位の土壌水分消費量を、経過日数的な積算数値で図示したものである。

表土層が比較的厚い試験区44では、表土層が主の第1層と第2層の土壌水分消費量が多い。これとは対照的に下層土の第3層・第4層・第5層における土壌水分消費量はかなり少ない。

表土層が比較的薄い試験区25では、土壌水分消費量はA層が主の第1層でもそう多くはない。第2層以下はB層になるが、第2層から第5層まで全層的に土壌水分消費量が多く、土壌水分の毛管上昇補給がかなり活発になされていることが推定される。

10月6日から11月10日までの対象期間全体(35日間)をとおした土壌水分消費量は、試験区44では、第1層 31.9mm、第2層 52.8mm、第3層 8.7mm、第4層 6.3mm、第5層 8.0mmで、合計で 107.7mmであった。同様に、試験区25では、第1層 26.5mm、第2層 31.0mm、第3層 19.8mm、第4層 17.8mm、第5層 11.4mmで、合計で 106.5mmであった。

両試験区の土壌水分消費量は、層別に見るとかなり異なった数字である。第1層・第2層では表土層が厚い試験区44の方が多く、第3層・第4層・第5層では表土層が薄い試験区25の方が多い。第1層から第5層までの合計ではほぼ同一の数値が得られた。

黒ボク土の表土厚さの相違によって、深さ方向に見た層別の土壌水分の消費状況はかなり異なったものになるが、土層全体で見た総量としてはほぼ似かよった数字

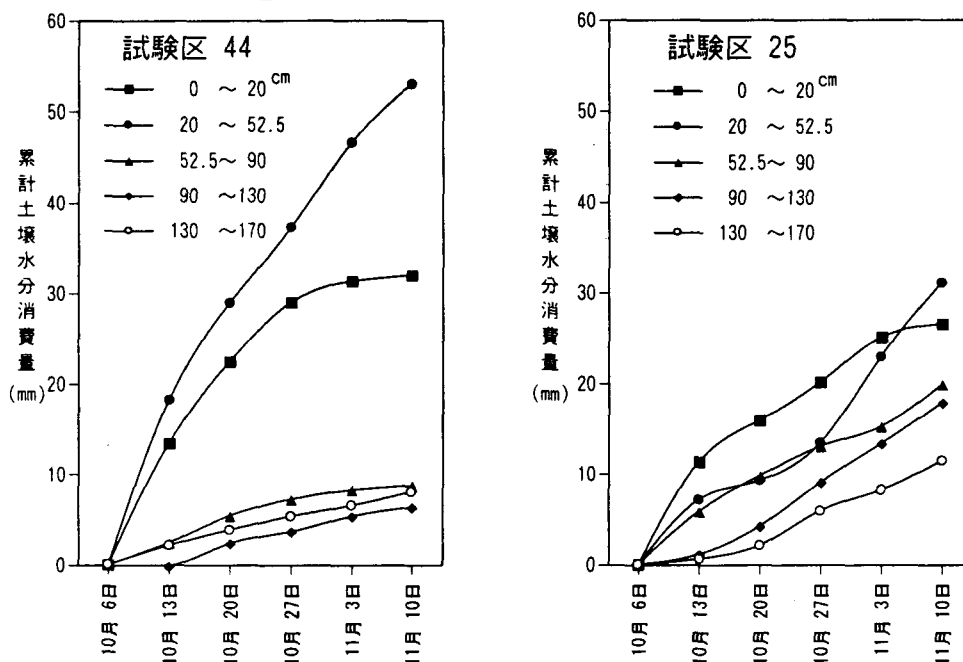


Fig.8 連続干天期における層別の累計土壌水分消費量(1997年10月6日～11月10日,1週間ごと)

Total consumptive use of soil moisture in each soil layers in the term of continuous fine days (October 6th ~ November 10th 1997, At intervals of one week)

になるようだということが推定された。

なお同じ期間の計器蒸発量の累計量は64.5mmであった。土壌水分消費量は計器蒸発量のほぼ1.65倍ということになる。この場合の土壌水分消費量は、蒸発散量でなく土壌面蒸発量が主体であるから、若干大きめの数字という印象を受けるが、対象土層厚を0～170cmと大きくとって検討したことが影響していると考えられる。

4. おわりに

黒ボク土の土壌断面は、黒褐色の表土層と褐色の下層土とに大きく分けられる。一般に表土層は土壌構造が発達した団粒構造で、保水性・排水性・通気性が良い。

これに対して下層土は褐色のカベ状構造に見える。

徳永ら(1986)は、南関東ローム(田無)の立川ローム下層土について、その孔隙の軟X線透写像の観察から、円管状孔隙が支配的で、草本根系の生成物である可能性が強いことを指摘し、通常“カベ状”などと呼ばれる黒ボク土下層土の自然構造は排水、保水の両機能を併せもつ高度の構造的な内包されているとみるべきであろうと主張している。本報の圃場試験区は、軟X線透写像などによる本格的調査はなされていないので、明確なことは言えないが、徳永らの指摘が当たっている可能性は高い。

本報の圃場試験区を含め、黒ボク土の土壌断面は大きく分けて、土壌物理性が異なる表土層と下層土との2層構造と見なすことが出来るように思われる。

本報では、黒ボク土の表土層の厚さの相違によって、浅い層、深い層における層別の土中水分変動状況と土壌

水分消費量が、かなり異なったものになることを明らかにした。これは表土層と下層土とで、土壌物理性がかなり異なることに起因すると考えられる。表土層と下層土との境界、とくにソフトロームと呼ばれるB層の存在が、土壌水分の毛管上昇などの縦方向移動に対して不連続面としての作用をする可能性が高い。

とくに黒ボク土の表土層と下層土の境界が深い場合には、表土層が保有する有効水分量の総量が非常に多量となるので、上記のような傾向性が強まって、表土層(A層)内における土中水分の「湿潤～乾燥」の変動幅を大きくするのでないかと筆者は推測している。

ただし、土中水分の変動は表土層の厚さと共に、根の分布との関連性が深い筈で、根の到達深さや主根群域、これとA層・B層、および境界面とのかかり合いなどは重要な研究課題であり、近々に本試験圃場にて調査を実施する予定である。

謝辞: 本報の調査・試験・研究の場となった肥料三要素連続施用栽培試験は、明治大学科学技術研究所のプロジェクト研究として「総合研究」に採択され実施したものである。

本報告はこの「総合研究」の中で得られた研究成果である。共同研究を行っている本学の教員各位、科学技術研究所の関係各位、観測や試験に協力していただいた農地環境工学研究室ゼミ生各位に謝意を表す。とくに明治大学農学部、箱崎教授には貴重な助言をいただいた。また同大学院農学研究科博士前期課程の渡辺千洋氏には多大なご尽力をいただいた。記して深甚なる謝意を表します。

引用文献

- 関東ローム研究グループ(1965): 関東ローム その起原と性状, 築地書館, p.52.
- 吉良芳夫ら(1963): 関東ロームの畑地水分(I), 農業土木研究 別冊第7号, p.76-80.
- 河野広(中川昭一郎監修)(1988): 最新の灌漑技術, 農業電化協会, p.178-181.
- 中矢哲郎(1998): 黒ボク土畑地の土壌断面の物理的特性が水分移動動態に及ぼす影響, 明治大学農学研究科修士論文
- 西村明宏, 江崎要(1995): 施肥三要素の連続施用が土壌物理性に及ぼす影響に関する研究(1)～特に耐水性団粒を中心に～, 平成7年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, p.654-655.
- 千家正照(「畑地灌漑の新展開」編集委員会)(1992): 畑地灌漑の新展開—明日の畑かんを目ざして—, 畑地農業振興会, p.161-183.
- 徳永光一ら(1986): 火山灰下層土における粗孔隙の根成的特徴について—立体視による孔隙の軟X線透写像観察—, 農土論集, 126, p.75-86.
- 戸澤英男(1981): トウモロコシの栽培技術, 農産漁業文化協会, p.90.
- 山崎不二夫・竹中 肇(1965): 風乾がアッタベルグ限界に及ぼす影響, 農土論集, 14, p.46-48.
- [1999. 6. 1. 受稿, 2000. 6. 26. 閲読了]
[この研究論文に対する公開の質疑あるいは討議(4,000字以内, 農業土木学会論文集編集委員会あて)は, 2001年2月24日まで受付けます.]

The Influence on the Variation of Soil Moisture Caused by the Thickness of Surface Soil Layer in an Upland Field of *Kuroboku* Soil

—Observation, Experiment and Research in the Continuous Yearly Use Test Field of Three Major Nutrients of Chemical Fertilizers (I)—

EZAKI Kaname^{*}, NAKAYA Tetsuo^{**}, TAKAHASHI Yoshitaka^{***} and YANAGISAWA Tsuyoshi^{****}

^{*} Faculty of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki 214-8571, JAPAN

^{**} National Research Institute of Agricultural Engineering, 2-1-2 Kannnonndai, Tsukuba 305-8609, JAPAN

^{***} A sake brewer and Agriculture, 157 Awao, Terai, Nomi, Ishikawa 923-1101, JAPAN

^{****} Graduate School of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki 214-8571, JAPAN

Abstract

The soil layer in an upland field of *kuroboku* soil is divided roughly into a surface soil layer and subsoil layer. The physical properties of soil are considerably different between them.

This study demonstrated that the differences in the thickness of the surface soil layer has influence on the quantitative variation, consumptive use and vertical movement of soil moisture in the several soil layers of vertically different depths. The writers gave particular attention to the variation of matric potential in comparatively deep soil layers. Soil layer depths of the examination ranged from the surface to 170 centimeters.

Two test plots of considerably different surface soil thickness were investigated comparatively and contrastively. As a result of this examination, it was clarified that the aspects of vertical movement and consumptive use of soil moisture were considerably different depending on the disparity of boundary depth between an A-horizon and B-horizon.

This paper is the result of an examination, which was performed in a test field of continuous long-term yearly use of the three major nutrients of chemical fertilizers. This study was performed in the agricultural experimental field of Ikuta school of Meiji university, and the nature of the soil is *Kanto* loam soil layer.

Key Words : Soil moisture movement, Water retentivity, Matric potential, Soil moisture consumptive use, *Kanto loam*

数種の施肥連用と2種の作物連作による土層の硬さについて

—肥料三要素連続施用圃場試験区における調査・試験・研究—

江崎 要*

渡邊千洋**

柳澤 剛***

静川英宏***

*明治大学農学部, 〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1.

**大仙株式会社, 〒440-0083 豊橋市下地町字柳目20.

***明治大学大学院農学研究科, 〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1.

要 旨

肥料三要素圃場試験区において、数種の施肥連用と2種の作物連作によって生じた土壌物理性の変化を、土層の硬さに着目して、長谷川式土壌貫入計を使用し検討した。土層の硬さは、長谷川式土壌貫入計では軟らか度で示されるのが普通であるが、筆者らは深さ10cm貫入するのに必要な打撃回数で表示することにした。

地表から深度1mまでの打撃回数と、深さ方向に10cm単位に分け、10cmあたりの打撃回数との両者について、統計的手法により検討した。この結果、エダマメ試験区とトウモロコシ試験区との同一作物試験区内では、施肥の種類別による有意差は認められなかったが、エダマメ試験区とトウモロコシ試験区との異なる作物試験区間では、有意差が認められた。ゆえに2種の作物の長期連作の違いによって、土層の硬さに差違が生じてきたと判断される。

キーワード：土層の硬さ、長谷川式土壌貫入計、山中式硬度計、コーンペネトロメータ、肥料三要素試験、関東ローム、有意差検定

1. はじめに

明治大学生田校舎内の圃場に、肥料三要素圃場試験区がある。筆者らはこの圃場試験区において、化学肥料を長期間連用した場合の土壌物理性の変化について、調査・試験・研究を行っている。本研究シリーズの第Ⅰ報として、黒ボク土畑地において表土層が厚いか薄いかその層厚によって、深さ方向に見た場合の土中水分変動の様相に、かなりの差違が認められることを報告した(江崎ら, 2000)。

本報告では長谷川式土壌貫入計(道路緑化技術基準・同解説, 1988)を使用して測定した「土層の硬さ」を中心に論述する。肥料三要素圃場試験区の土壌物理性の変化について、数種の施肥の長期連用、および2種の作物の長期連作によって生じた「土層の硬さ」の相違を中心に検討し若干の評価を試みる。

2. 調査圃場の概要と調査方法

肥料三要素圃場試験区は、1974年から1999年まで26

年間、毎年同じ方法で継続的に栽培された。エダマメ栽培区24試験区とトウモロコシ栽培区24試験区、計48試験区からなる(以下エダマメ区、トウモロコシ区と略称する)。エダマメ区はN・P・K・NK・NP・PK・NPKの7種類の施肥区と施肥なし区の計8種類で、各3反復で設計されている。トウモロコシ区はK・PK・NK・NPKの4種類の施肥区で6反復である。品種はエダマメが白鳥枝豆、トウモロコシはハニーバンダム(スクランブル88)である。施肥量は毎年定量である。各試験区の配置は、Fig. 1に示すとおりで、場所による違いも考慮して、エダマメ区は3ブロックに、トウモロコシ区は6ブロックに大別されている。各ブロック内における試験区と施肥の種類との対応は、実験計画法の乱塊法で決定された。

試験区の大きさは、エダマメ区が約1.7×5.0m、トウモロコシ区が約2.1×5.0mである。各区の長辺に平行に3列の作条として作付けされる。例年4月下旬に播種され、エダマメは7月下旬、トウモロコシは8月上旬に収穫される。1年1作で、収穫後は無作付け状態の畑地となる。エダマメとトウモロコシの作付けは高さ10cmほどの畦たてが行われ、畦上にバランスよく3列(作条間隔がほぼ短辺長

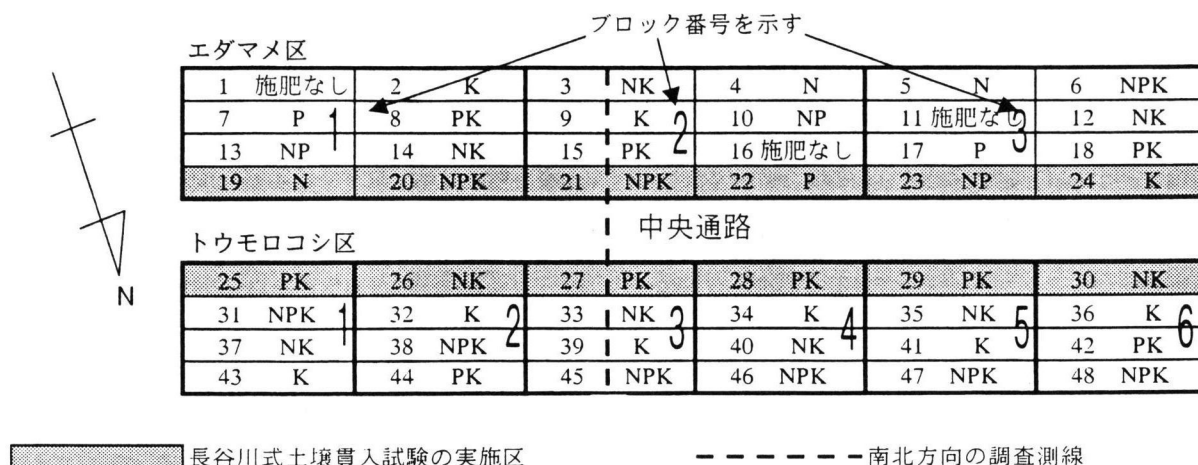


Fig. 1 圃場試験区の概略

A rough sketch of the continuous yearly use test field of three major nutrients of chemical fertilizers

の 1/3)に播種される。

長谷川式土壌貫入計による土層の硬さの測定は、1998 年と 1999 年の両年にわたって無作付けの畑地状態の時期に実施した。1998 年の 9～12 月に、48 試験区全体を 3 反復測定した。各試験区のほぼ中央と、その地点から中央線上で長辺方向に約 1m 離れた両側の 2 点、計 3 地点である。試験器具操作の不慣れや天候による誤差を極力防ぐために、試験区 1 から試験区 48 まで、各試験区について 1 地点ずつの番号順の測定として、1 巡目、2 巡目、3 巡目と進行する周回的な調査にした。また降雨日と、降雨翌日の貫入試験の実施は避けた。

1998 年の調査結果を概略的に検討してみると、エダマメ区・トウモロコシ区ともに、同一作物間では有意差があまり生じていないが、エダマメ区とトウモロコシ区という総体的に見た作物間では有意差が認められた。しかしこの作物間の有意差も、黒ボク土表土厚さがトウモロコシ区の方が全体的に大きいので、表土厚さの違いという要因が関与している可能性も否定できなかった。

そこで 1999 年の調査では、エダマメ区とトウモロコシ区との有意差をより明確に把握する目的で、圃場試験区の中央通路（幅は約 40cm）に隣接するエダマメ区の 6 試験区とトウモロコシ区の 6 試験区を対比することにした。Fig. 1 の中で、19～24（エダマメ区）と 25～30（トウモロコシ区）の 12 試験区である。

測定は 1999 年 9～11 月に、エダマメ区は通路南端から 55cm、トウモロコシ区は通路北端から 70cm（各々試験区短辺の 1/3）離れた試験区内の長辺方向の線上で、6 試験区ともその線上のほぼ中央地点とそこから両側に約 1m 離れた 2 点、計 3 地点の測定である。エダマメ区とトウモロコシ区ともに、 $n=18$ の測定数となる。施肥の種類は同じではないが、同一作物の試験区間では施肥による有意差があまり認められていないので、通路を挟んだ近接地点に位置する両作物試験区の測定群（ $n=18$ ）の間に有意差が確認できれば、エダマメ区とトウモロコシ区とで、長

期間の連続栽培によって土層の硬さに差が生じていると判定しても良いことになる。

なお本文と図表の中で、表土と A 層と表現を変えている箇所があるが、これは同じ意味で用いている。

3. 土層の硬さと長谷川式土壌貫入計について

3.1 長谷川式土壌貫入計と土層の硬さの表示法

肥料三要素圃場試験区における調査・試験・研究を実施・継続している中で、土層の硬さに関する調査の必要性を強く感じていた。テンシオメータ受感部を埋設するためオーガで穴を掘る際に、各試験区によって土壌・土層の抵抗が微妙に異なっていて、硬い・軟らかいというような感触を受けるからである。とくにエダマメ区とトウモロコシ区とでは、かなりの相違があるように感じられた。このような土層の硬さの違いは、長期にわたる同一施肥の連用と同一作物の連作が影響していると推察されるからである。

畑地における土層の硬さは、作物の根の伸長や、その根群域などと深い関わり合いを持つものと想定される。しかしながら、土層の硬さの相違によって、作物の根系発達の様相がどのように変化するのか、というような具体的な課題になると、この種の研究はあまり多くはなさそうである。

土層の硬さについて、現在良く使用されており、信頼性も高く汎用性が高いのは山中式土壌硬度計であろう。これは戦後の日本において、生産力的な立場での土壌調査が全国的に普及・実施される中で、現地における土壌硬度を斉一的にかつ科学的に測定・表示する必要性が増大して、考案された計器である（山中金次郎・松尾憲一、1962）。この山中式土壌硬度計は土壌の生成学的な面からも、各層位の土壌硬度を簡単に測定し得る利便さゆえに、現時点でも土壌断面調査時の必携用具になっている。

この山中式土壌硬度計の硬度（mm）を中心に、根の伸

長が論じられることが多い。例えば、畑作物やミカン、茶樹などについての現地調査あるいは実験結果によると、根の伸長が抑制され始めるときの土層の硬さは山中式土壌硬度計の指標硬度 17~20mm、伸長が停止するときは指標硬度 25~27mm とされている（古賀汎, 1979）。また根群分布良好比率が急激に低下する緻密度は 22~23mm 前後が大部分であり、これは非火山灰土壌、火山灰土壌ともにほぼ同じ値を示す。この値が根群発達の良好な土壌緻密度の上限と言えよう（三好洋, 1972）。さらに別の文献によると、土壌硬度は根系の発達に大きく影響する。根は山中式土壌硬度計 20mm 以下の硬度で生長し、22mm 以上になると生長できない（山下正隆, 1998）とされている。

土層の硬さと根の分布・伸長との関係は、上記のような見解が代表的で一般にも受け入れられているようである。両者は互いに影響し合う相互関係にあると考えられるが、この詳細に関する更に踏み込んだ知見は、現時点では必ずしも明瞭になっているとは言えず、研究途上の段階にあると見てよさそうである。

山中式土壌硬度計を用いた測定は、試坑を掘る必要がある。土壌断面調査を行うような時以外には、現地盤の土壌構造を壊してしまうので、そう簡単には実施できない状況がある。比較的簡単に土層の硬さををはかる測定器具としては、コーンペネトロメータや SR II 型などがあるが、これらは主に軟弱地盤で使用される計器で、本圃場試験区も含め普通の畑地では、土層が硬すぎて、深さ 1m 程度までの調査を考えると、その使用は事実上不可能に近いと考えた方がよい。

このような問題の解決として、筆者は長谷川式土壌貫入計の使用を考えた。千家（1998）による農業土木分野における使用実績がある。同氏は改良山成畑工における農地造成に際し、作物の根群必要深から耕土深 60cm という深耕の妥当性を探るための調査の一環として、この器械を使用していた。筆者は本肥料三要素圃場試験区において、長谷川式土壌貫入計による調査の適用性が高いと判断して貫入試験を実施することにした。

長谷川式土壌貫入計は、もともとは造園分野で開発された測定計器であるが、道路緑化技術基準・同解説（日本道路協会, 1988）に収録されていて、日本道路公団規格になっている。また住宅・都市整備公団では監督必携（住宅・都市整備公団, 1989）として、いわゆる公団住宅団地の造成時に、植栽基盤の施工管理用として活用されている。現時点ではかなりオーソライズされた汎用的測定器具である。

長谷川式土壌貫入計は、19.6N の落錘を 50cm の高さから落下させ、そのエネルギーで先端の円錐コーン（20mm ϕ 、先端角 60°）を土中に貫入させる。その時の貫入深を読みとり（精度 1mm）、1 打撃あたりの貫入深を S 値（cm/drop）として、長谷川式軟らか度と称している。連続的に深さ 100cm まで測定できる。 S 値は 5 段階に分けられ

ていて、 S 値による判定は次のとおりである。 S 値が 0.7 以下であれば、多くの根が侵入困難（ \times ）（対応する山中式土壌硬度（mm）: 27 以上）、以下同様に、 S 値が 0.7~1.0 であれば根系発達に阻害あり（ \times ）（同: 27~24）、 S 値が 1.0~1.5 の範囲内であれば根系発達阻害樹種あり（ Δ ）（同: 24~20）、 S 値が 1.5~4.0 の範囲内であれば根系発達に阻害なし（ \bigcirc ）（同: 20~11）、 S 値が 4.0 以上は膨軟過ぎ（同: 11 未満）、とされる（建設大臣官房官庁営繕部, 1997）。

千家の報文（1998）では、 S 値ではなく動的貫入抵抗値（ R_d : kg/cm²）として、深さ 1m までオランダ公式により、支持力強度の鉛直分布として整理されている。

筆者らは、 S 値を基本にした整理を試みた。しかし S 値は土層の硬さが大きいところは数値的には小さく、反対に土層の硬さが小さいところが数値的には大きくなる。Fig. 2 のように、図から受ける印象と実際の土層の硬さとは、逆の関係にあることを念頭に置き、思考の逆転をしなければならない。

そこで S 値とは逆に、 $1/S$ の値、これは単位長さ（cm）あたりの打撃回数を意味することになるが、これを指標にしてみれば如何かと考えた。その結果が Fig. 3 である。この図は実際の土層の硬さを視覚的に表現するという意味ではかなり改善されている。しかし細かすぎるのでないかという難点是否めないであろう。とくに肥料三要素圃場試験区の土壌物理性の変化を、土層の硬さの観点から比較・検討しようという目的では、その解析作業に困難を伴うことも予想される。

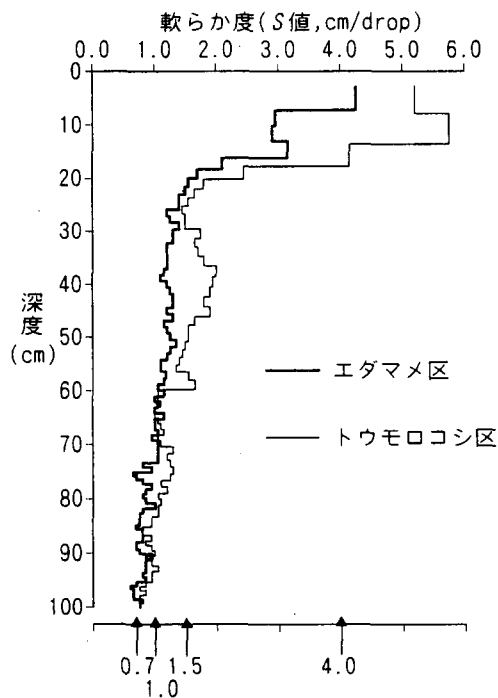


Fig. 2 長谷川式土壌貫入計による軟らか度 (S 値)
 The degree of softness (S value) of soil layer in the case of a Hasegawa type soil penetration tester

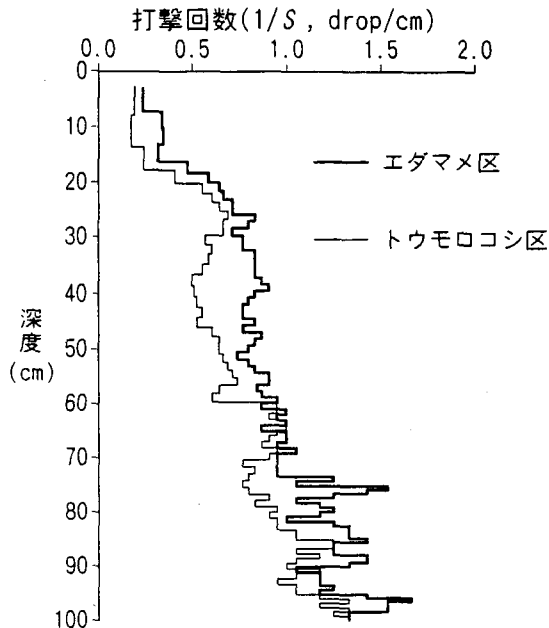


Fig. 3 1/S, 単位長さ(1cm)貫入に必要な打撃回数

1/S, The numbers of knocks needed to be penetrated at intervals of unit length (one centimeter depth) in the vertical direction of soil layer

別の整理方法として、円錐コーンを深さ方向に 10cm 貫入させるのに必要な打撃回数を指標とすることを考えた。深さ 0~10cm, 10~20cm というように深度 10cm の単位別に、深さ 1m まで深度別に打撃回数を整理するという方法である。具体的に例示すると 3 回目の打撃で円錐コーンの到達深度が 10cm, 同 7 回目で 20cm であれば、深さ 10~20cm 間の打撃回数は 4 回である。しかし円錐コーンの貫入深は一般に 9.0cm (打撃 3 回目) ~ 11.0cm (同 4 回目) というように、10cm 単位のきりの良い範囲に入らないのが普通なので、この場合には比例計算によってその境界の上・下に、前述の例では 0.5 回ずつ割り振ることにした。

長谷川式土壌貫入計は、原理的にはボーリングの際に実施される標準貫入試験とよく似た手法と言える。N 値は 622.7N のハンマーを 75cm 自由落下させ、サンブラを 30cm 打ち込むのに要する打撃数である。したがって N 値に準じた整理が理解しやすいのではないかと考えた。

肥料三要素試験圃場の各試験区の土壌物理性の変化を、土層の硬さという観点から比較・検討するには、10cm 程度の貫入深さが適当な深度区分ではなかろうかと判断した。Fig. 2, 3 と同じ数値データを使用して、深さ 10cm 単位に図示したのが Fig. 4 である。

Fig. 4 の図中下側に、2.5 などの数字とともに矢印を付しているが、これは S 値から計算したものである (S 値が 4 であれば 1 回の打撃で 4cm 貫入するので、10cm では 2.5 回の打撃回数である)。深さ 10cm 貫入のために必要な打撃回数が、14.3 回以上 (S 値 0.7 以下に相当) では多くの根が侵入困難、14.3~10 回 (S 値 0.7~1.0 に相当) は根系の発達に障害あり、10~6.7 回 (S 値 1.0~1.5 に相当) は根系発達

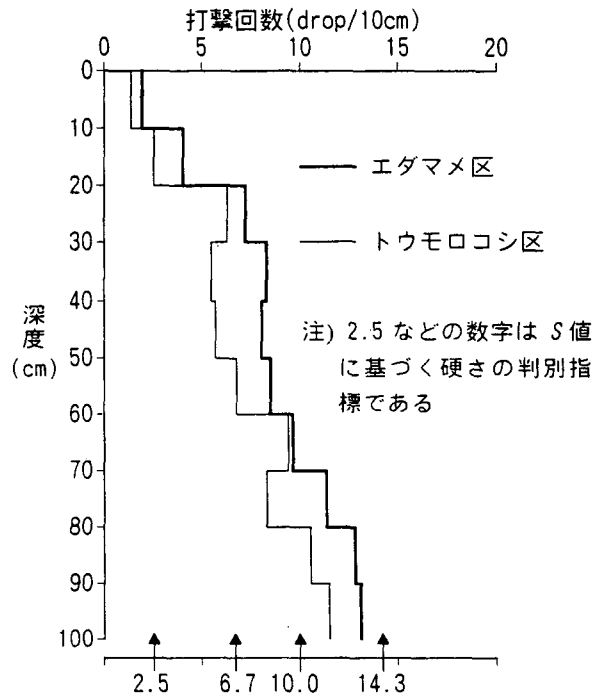


Fig. 4 深さ 10cm 貫入に必要な打撃回数

The numbers of knocks needed to be penetrated at intervals of each ten centimeters depth in the vertical direction of soil layer

障害樹種あり、6.7~2.5 回 (S 値 1.5~4.0 に相当) は根系発達に障害なし、2.5 回以下 (S 値 4.0 以上に相当) は膨軟過ぎ、ということになる。

長谷川式土壌貫入計による試験を、圃場試験区中央通路に隣接するエダマメ区 6 試験区 3 反復 ($n=18$) およびトウモロコシ区 6 試験区 3 反復 ($n=18$) 実施した。深さ 100cm までの打撃回数はエダマメ区は 56~108 回、トウモロコシ区は 41~100 回でかなりのばらつきが見られた。そこでエダマメ区トウモロコシ区各々について、18ヶ所の貫入試験からメディアン の考え方に準拠して、打撃回数で 9, 10 番目のデータを平均した。この数値にもとづき Fig. 2 は軟らか度 (S 値)、Fig. 3 は 1/S、単位長さ (1cm) 貫入に必要な打撃回数、Fig. 4 は深さ 10cm 貫入に必要な打撃回数を示した。これらの図から、土層の硬さはエダマメ区とトウモロコシ区とで若干の差があって、トウモロコシ区の土層の方が軟らかいことが判読されよう。

本圃場試験区も含め、一般の多くの畑地、その他において、長谷川式土壌貫入計は有効に使用できるように思われる。軟弱地盤で使用するコーンペネトロメータは、ロットの周辺摩擦によってほぼ 30cm 以深はコーン指数が過大になりがちである。コーンペネトロメータの貫入中に、浅い深度の軟らかい粘土層が、塑性流動的に動きロット周辺方向に集まってきて周辺摩擦が生ずるからである (江崎要ら, 1973)。しかし、長谷川式土壌貫入計は周辺摩擦の影響が殆ど見られないので、原位置の土層の硬さをほぼ正確に反映しているように考えられる。また重錘

の自由落下を基本としているので、試験者の違いや技能的熟練などの人為的誤差の問題を殆ど心配する必要性は無さそうだという利点がある。

長谷川式土壌貫入計は、誰でも比較的簡単に扱え汎用性が高いので、農業農村整備事業の多くの工事現場において利用可能でないかと感じられる。例えば、改良山成畑工でリッパー掛けの必要性の判定には最適であろうし、また各種の盛土工事において、その締め固めの施工管理などにも利用できるのではないかと考えている。

3.2 長谷川式土壌貫入計と山中式土壌硬度計との関係

山中式土壌硬度計による指標硬度 (mm) と長谷川式土壌貫入計による軟らか度との関係は、長谷川ら (1981) によると、関東ロームと砂地では異なるが、レキの少ない関東ロームの畑地においては、 $y = 29.1 - 4.53x$ という回帰式が得られたという (ここで、 y は山中式土壌硬度計による指標硬度 (mm)、 x は長谷川式土壌貫入計による軟らか度で、相関係数 0.923 であった)。

筆者らは肥料三要素圃場試験区に隣接する自然放任区において、既に深さ 2m までの土壌断面調査を実施している。この調査時に、山中式土壌硬度計による指標硬度 (mm) と長谷川式土壌貫入計による深度 10cm あたりの打撃回数との関係を求めた (柳澤剛ら, 1999)。この結果が Fig. 5 である。長谷川式土壌貫入計による測定範囲は深さ 1m までなので、Fig. 5 の 10cm あたりの打撃回数は、深さ 2m の試坑を 3 段に分けて測定したものである。

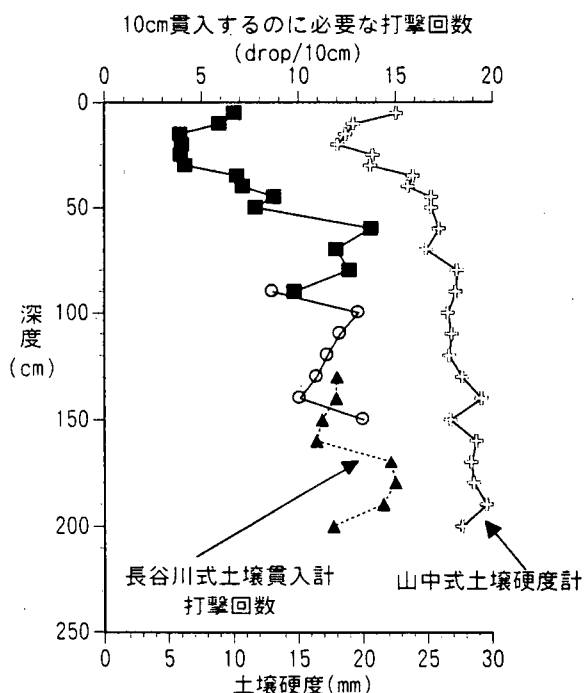


Fig. 5 長谷川式土壌貫入計と山中式土壌硬度計の関係
Comparison on the hardness of soil layer between a Hasegawa type soil penetration tester and a Yamanaka type soil hardness tester

土壌断面は、黒ボク土表土層が約 25cm の厚さであり、その下位は黒ボク土の下層土に移行する。両者の境界は比較的明瞭である。下層土は比較的薄いソフトロームから、ハードロームに移行して行く。ほぼ 40~50cm の深さからはハードロームになるが、この深度から 2m 位の深さまでの上層については、大局的に大きな変化は無いと見てよさそうである。なお、ハードロームの土層における山中式の指標硬度はかなり大きく、25mm 以上がむしろ普通でたまに 30mm 以上の測定値も見られる。

同じ深度で対応する、山中式土壌硬度計による指標硬度 (mm) (Y) と長谷川式土壌貫入計によって深さ 10cm 打ち込むのに必要とした打撃回数 (X) との関係について検討した。Fig. 5 に見られるように、両者は深さ方向に見ておおむねパラレルの関係にあるので、両者には高い相関性があるように思われる。結果は、 $Y = 0.796X + 17.5$ (但し、 $3 < X < 16$) という回帰式が得られ、相関係数は 0.867 であった。両者には強い相関関係が認められた。このことは現地盤を壊さないと実施できない山中式土壌硬度計の調査を、代替的な措置として、非破壊的な方法である長谷川式土壌貫入計が適用できそうな可能性を示すものと考えられる。

4. 調査結果と考察

4.1 エダマメ区における施肥条件と場所(ブロック)による差について

収穫が終わると、試験圃場は自然状態で放置されるので、2~3ヶ月も経過すると降雨などによって、畦の高さは栽培時よりもかなり低くなる。それでも畦の形状は残っているため、長谷川式土壌貫入計で測定する際には、測定個所の近辺をならして平均的な高さになるようにした。これを基準高さにするが、計器の設置時に、重錘の自重などで若干沈む。この沈下量を読みとってから第1回の打撃に移る。深さ 1m まで打撃を続け各打撃回数ごとにコーン到達深度を記録する。

長谷川式土壌貫入計による土層の硬さに関するエダマメ区の測定結果を Table 1 に示した。エダマメ区においてこの表をもとに施肥条件と場所(ブロック)の2つの因子について、「0~100cm 間の打撃回数に差があるのか」を、繰返し数の等しい 2 元配置の分散分析を行い、両因子の効果を解析した。

検定の結果、打撃回数には施肥条件による有意差は認められなかった。一方ブロック間では打撃回数に有意差が認められた (1%水準)。Table 1 から判読されるように、エダマメ区の西側に位置しているブロック 3 が、ブロック 1 および同 2 よりも打撃回数が多く、土層の硬さが緻密になっていると判定される。

次に、深さ方向の打撃回数の変化を知るために、測定深度 100cm に対して、深さ 10cm ごとに 10 分割し、同一深度の打撃回数を比較する目的で、施肥条件とブロックを 2

Table 1 土層の硬さ 深さ 1m までの打撃回数 エダマメ区

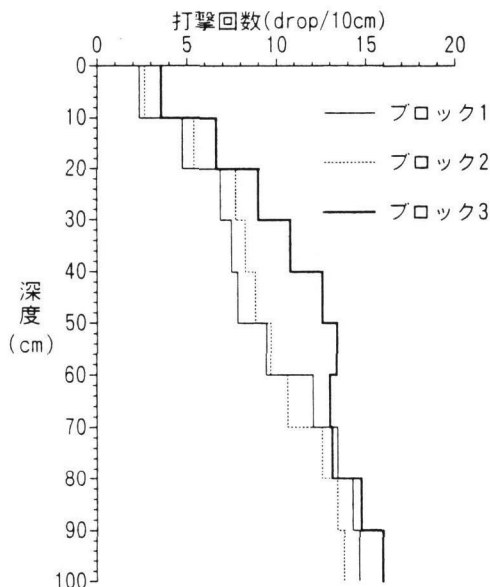
The hardness of soil layer The numbers of knocks needed to be penetrated one meter depth The test field of green soybean

| | ブロック1 | ブロック2 | ブロック3 | 平均 | 標準偏差 |
|------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------|-------|
| 施肥なし | 99.3 101.0 97.2 | 114.0 106.5 113.3 | 78.8 96.6 133.0 | 104.4 | 15.0 |
| N | 95.6 90.1 91.0 | 106.4 113.8 106.9 | 93.2 122.0 120.1 | 104.3 | 12.5 |
| P | 88.6 107.3 88.2 | 69.7 76.7 67.6 | 114.8 110.7 97.7 | 91.3 | 17.6 |
| K | 89.7 98.9 73.4 | 113.8 78.3 100.8 | 110.0 100.5 130.8 | 99.6 | 17.8 |
| NP | 107.6 90.7 87.4 | 83.0 117.5 98.0 | 75.6 88.0 106.0 | 94.9 | 13.4 |
| PK | 87.0 107.8 87.4 | 75.8 82.5 90.7 | 112.7 113.6 153.2 | 101.2 | 23.8 |
| NK | 96.8 75.3 108.7 | 94.2 103.3 103.0 | 107.5 132.8 139.0 | 106.7 | 19.3 |
| NPK | 112.0 93.6 62.0 | 85.6 65.6 65.6 | 116.0 120.0 133.5 | 94.9 | 26.8 |
| 平均 | 93.2 | 93.0 | 112.8 | 総平均 | 総標準偏差 |
| 標準偏差 | 11.9 | 17.3 | 19.1 | 99.7 | 18.6 |

施肥因子による有意差 : 無し
 ブロック因子による有意差 : * (有意水準 5% 有意)

つの要因とする 2 元配置の分散分析を行った(渡邊千洋, 2000)。

検定の結果, 全ての深度において, 施肥条件の違いによる有意差は認められなかったが, ブロック間では深度によって有意差が認められた。Fig. 6 はエダマメ区の 3 ブロックについて, 各ブロック内における 8 試験区の平均打撃回数を深さ方向に示したものである。この図からも理解されるように, 深度 60cm までの 10cm ごとの各深度で

**Fig. 6** エダマメ区におけるブロック別打撃回数の比較

The comparison on the numbers of knocks needed to be penetrated in the three different blocks of test fields of soybean

は, 打撃回数に有意差が認められた (1%水準)。また深度 60~90cm では打撃回数に有意差は認められなかったが, さらに深い 90~100cm では打撃回数に有意差が認められた (5%水準)。

60cm 以深はハードロームと称される比較的緻密な層になるので, 10cm あたりの打撃回数が多くなり, エダマメ区の各試験区間における相対的な差違が小さくなるものと考えられる。Fig. 6 によると, A 層・B 層境界の下位にあたと想定されるほぼ 30cm から 60cm までの深度が, 場所 (ブロック) による打撃回数の差違, 即ち土層の硬さの相異がかなり明瞭に表現されているように考えられる。

4.2 エダマメ区とトウモロコシ区における土層の硬さの相違

長期間の連続栽培による作物の違いが, 土層の硬さに及ぼす影響を明らかにするために, エダマメ区全 24 試験区 ($n=72$) とトウモロコシ区全 24 試験区 ($n=72$) を対象に, 0~100cm の打撃回数について有意差の有無を検討した (t 検定)。同様に, エダマメ区とトウモロコシ区の両者に共通する施肥条件の試験区を対象に, 同施肥どうしの有意差検定も行った。エダマメ区 3 試験区 ($n=9$) とトウモロコシ区 6 試験区 ($n=18$) である。この結果が Table 2 である。

エダマメ区全 24 試験区とトウモロコシ区全 24 試験区, 試験圃場全体としての比較では, 0~100cm の打撃回数に有意差が認められた (1%水準)。また同施肥どうしの検定でも PK 区以外は有意差が認められた (5%水準)。エダマメ区全試験区とトウモロコシ区全試験区の打撃回数の 95%信頼区間は, $63.1 \leq \text{エダマメ区} \leq 136.2$, $39.6 \leq \text{トウモロコシ区} \leq 120.2$ である。同施肥どうしでも打撃回数は, 全般的にエダマメ区の方がトウモロコシ区を上回っていて, 有意差が認められなかった PK 区でもこのような傾向性には変わりはない。以上により土層の硬さはエダマメ区とトウモロコシ区とで異なることが判定される。

土層の硬さがエダマメ区とトウモロコシ区とで異なる理由については, エダマメとトウモロコシとの作物の種別によって根の伸長の仕方が異なることが第一に考えられる。戸澤秀男 (1981) によると, トウモロコシの根は条件によって異なるが, かなりの根は 1m 前後の深層に伸びる。また深層に達した根は有機物源としてだけでなく土

Table 2 エダマメ区とトウモロコシ区との施肥別打撃回数
The numbers of knocks needed to be penetrated by the several kinds of chemical fertilizers in the test fields of soybean and corn

| | 有意差 | 打撃回数信頼区間(信頼度 95%) | | | |
|------|------|-------------------|-------|---------|-------|
| | | エダマメ区 | | トウモロコシ区 | |
| | | 下限値 | 上限値 | 下限値 | 上限値 |
| 全作物間 | 有り** | 63.1 | 136.2 | 39.6 | 120.2 |
| NPK | 有り* | 42.4 | 147.4 | 33.6 | 107.7 |
| PK | 無し | 54.6 | 147.8 | 46.3 | 123.6 |
| NK | 有り* | 68.8 | 144.7 | 35.3 | 131.4 |
| K | 有り* | 64.8 | 134.4 | 47.6 | 113.8 |

** 有意水準 1% * 有意水準 5%

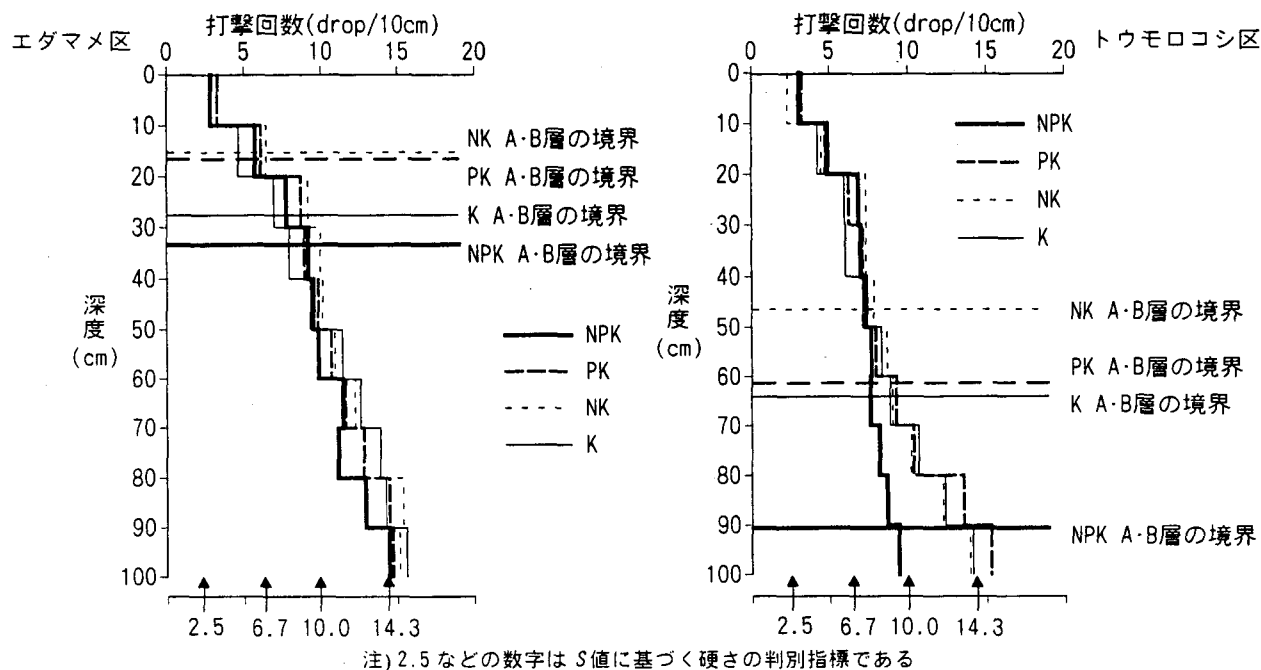


Fig. 7 エダマメ区とトムロコシ区における施肥別打撃回数の比較

The comparison on the numbers of knocks needed to be penetrated by the several kinds of chemical fertilizers in the test fields of soybean and corn

層を改良するとされている。田中典幸(1998)によると、エダマメの根系の分布については、主根基部から出現する1次側根は、土壌条件が良好な場合は直径が5~7mmに達し、根長も水平方向に100cm以上に伸長する。一方、鉛直方向への根の伸長は30~60cmで、水平方向に比べて大きくないので、根系は横広がり半楕円形の分布となる。本試験圃場の目視観察でもトムロコシ区の方がエダマメ区よりも根の分布は深い。しかし論議を進めて来ている現時点段階では、土層の硬さが2種の作物間で異なることの理由が、黒ボクの表土厚(A層厚)の違いが関与・影響している可能性も否定できない。この問題については次節で検討する。

次に深さ方向の10cm打撃回数の変化を、エダマメ区とトムロコシ区の両者に共通する施肥条件のもとに、作物別の検討を行った。この結果がFig. 7である。

この左右の図から打撃回数は、全般的にエダマメ区の方がトムロコシ区よりも多いことが読みとれる。

同一の作物試験区内では、施肥の種類別による打撃回数の有意差はあまりなかった。エダマメ区においては、施肥の種類別による打撃回数の有意差は、0~100cmにおける各10cm単位の全ての深度において、認められなかった。一方トムロコシ区では大半の深度において有意差は認められなかったが、比較的深い80~90cm、90~100cmの深度においては有意差が認められた(1%水準)。この深度ではNPK区が他の施肥条件に比較して、打撃回数がかなり少なく土層が軟らかいことを意味する。トムロコシ区のNPK試験区が、結果的に表土厚さが比較的深い

と考えられる最も北側の列に多く配置されているので、A層厚さが関与している可能性が考えられる。なおトムロコシ区についても、施肥条件とブロックの2つの因子について、「0~100cm間の打撃回数に差があるのか」を繰り返し数の等しい2元配置の分散分析を行ったが、検定の結果は、エダマメ区と同様に、施肥条件またはブロックによる有意差は認められなかった(渡邊千洋, 2000)。

Fig. 7の図中下側には、2.5などの数字とともに矢印を付しているが、Fig. 4と同様の趣旨で、土層の硬さの程度を判別し易くした。

4.3 エダマメ・トムロコシの長期連続栽培と土層の硬さや表土厚さなどとの関係

エダマメ区全体とトムロコシ区全体との間に、土層の硬さに有意差が存在することを前節で明らかにしたが、これが異なる作物の長期連続栽培による結果だと言えるのか判断に迷うところがある。エダマメ区全体とトムロコシ区全体との間で、黒ボク土表土厚さが異なっていて、トムロコシ区の方が全般的に表土厚さが深い。これが土層の硬さに影響している可能性が否定出来ないからである。

Fig. 1の中央通路を挟んだ異なる作物試験区において、近接地点における土層の硬さを、長谷川式土壌貫入計の打撃回数によって比較することにした。これに有意差が認められれば、エダマメとトムロコシの長期連続栽培が土層の硬さに影響を及ぼしたと判断しても良いと考えられる。

Table 3 エダマメ区とトウモロコシ区との深度別打撃回数

The numbers of knocks needed to be penetrated, corresponding to different depths of soil layer in the test fields of soybean and corn

| | 有意差 | 打撃回数信頼区間(信頼度95%) | | | |
|----------|------|------------------|-------|---------|------|
| | | エダマメ区 | | トウモロコシ区 | |
| | | 下限値 | 上限値 | 下限値 | 上限値 |
| 0~100cm | 有り** | 56.9 | 109.9 | 41.3 | 94.5 |
| 0~10cm | 有り** | 0.4 | 3.5 | 0.6 | 1.9 |
| 10~20cm | 有り** | 1.4 | 7.9 | 1.4 | 5.2 |
| 20~30cm | 無し | 3.0 | 10.7 | 4.5 | 7.6 |
| 30~40cm | 有り** | 4.1 | 9.2 | 2.9 | 8.0 |
| 40~50cm | 有り* | 4.2 | 11.3 | 2.7 | 10.4 |
| 50~60cm | 有り** | 2.5 | 17.4 | 2.5 | 11.4 |
| 60~70cm | 有り** | 4.2 | 17.3 | 2.7 | 13.1 |
| 70~80cm | 有り** | 5.8 | 17.1 | 3.1 | 13.5 |
| 80~90cm | 有り** | 8.6 | 16.5 | 3.9 | 16.0 |
| 90~100cm | 有り** | 10.9 | 16.7 | 4.8 | 17.6 |

**有意水準1% *有意水準5%

Table 3 はエダマメ区に属する 6 試験区 ($n=18$) とトウモロコシ区に属する 6 試験区 ($n=18$) の打撃回数の両標本群間に、有意差があるのか t 検定を行った結果である。同時に打撃回数の 95%信頼区間も示した。なお **Table 3** では、地表から深さ 1m (0~100cm) までの打撃回数とともに、10cm 単位ごとの各深度における打撃回数を示している。

深さ 1m までの打撃回数は勿論のこと、10cm 単位ごとの各深度における打撃回数についても、20~30cm の深度を除いて、有意差が認められた (殆どが 1%水準)。

トウモロコシ区の方がエダマメ区よりも打撃回数が少ないことが **Table 3** から読みとれる。有意差が認められなかった 20~30cm の深度についてもこの傾向は同様である。したがって経年的な長期連続栽培によって、トウモロコシ区の方がエダマメ区よりも土層の硬さが全体的に軟らかくなったと判定される。

また別の角度からも検討するために、長谷川式土壌貫入計の打撃回数の測定を行った箇所 (**Table 3** と同位置, $n=18$) のごく近傍地点で、黒ボク土表土厚さの測定を検土杖によって実施した。この結果が **Table 4** であるが、 t 検定によって有意差が認められ、トウモロコシ区の方がエダマメ区よりも黒ボク土表土厚さが深いと判定された (10%水準、片側検定)。

次に **Fig. 8** は、エダマメ 24 試験区およびトウモロコシ 24 試験区について、長谷川式土壌貫入計による深さ 1m (0~100cm) までの打撃回数 (3 反復平均) と検土杖による表土厚さ (各試験区中央) との関係を示したものである。この図からもエダマメ区とトウモロコシ区とは異なる関係にあることが判読される。

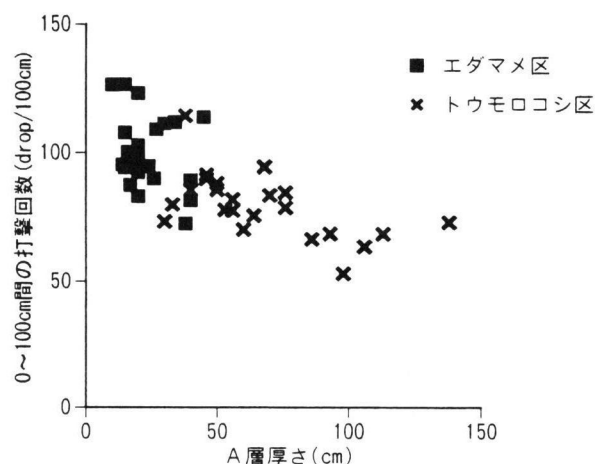
Table 4 で中央通路を挟んで隣接する、エダマメ 6 試験区とトウモロコシ 6 試験区について表土層の厚さを検討したが、これが異なる 2 種の作物の影響によるものと考えてよいのか別の観点から検討してみる。

Table 4 エダマメ区とトウモロコシ区との表土厚さの比較

Comparison on the depth of surface soil layer between the soybean and the corn test fields

| | A層厚さ(cm)の平均値と信頼区間(信頼度90%) | | | | | |
|-----|---------------------------|------|------|---------|-----|------|
| | エダマメ区 | | | トウモロコシ区 | | |
| | 平均値 | 下限値 | 上限値 | 平均値 | 下限値 | 上限値 |
| 有意差 | 32.0 | 12.9 | 51.1 | 38.8 | 7.9 | 69.7 |

*有意水準10%

**Fig. 8** エダマメ区とトウモロコシ区における長谷川式土壌貫入計と表土厚さとの関係

The relationship between numbers of knocks measured by a Hasegawa type soil penetration tester and surface soil layers depth in the soybean and the corn test fields

前報(江崎ら, 2000)で述べたように、この試験圃場は南側から北側へ全体的に 7~12%程度の緩傾斜をしているので、慢性的な表土の土壌侵食があるのではないかと指摘がある。高さが下位にあたるトウモロコシ栽培区はこの土壌侵食の受け皿となって表土が徐々に堆積し表土層が厚くなる、逆に上位にあたるエダマメ栽培区は表土層が相対的に薄くなる、という見方である。

この土壌侵食の可能性は一概に否定できない。そこで試験区 3, 9, 15, 21 (エダマメ栽培区)、試験区 27, 33, 39, 45 (トウモロコシ栽培区)の南北方向(各試験区の中央線)について **Fig. 9** のように地表面と A・B 層の境界の高さについて縦断図を作成した。

Fig. 9 に示されている地表面の高さは実際の高さであり、試験圃場の傾斜の状況がある程度把握できるであろう。更に検討を進めるために、この地表面の高さを基準の高さと仮定して A 層の厚さをプロットした。これが **Fig. 10** である。南北方向の線を X (試験区 3 の南端を原点 0 とする、cm) とし、A 層厚さを Y (cm) とすると、A 層厚さの回帰式が得られ、エダマメ栽培区は $Y = 0.0417X + 15.09$ (但し、 $0 \leq X \leq 680$)、トウモロコシ栽培区は $Y = 0.0410X + 36.59$ (但し、 $720 \leq X \leq 1600$) となった。

この A 層厚さの回帰式によって、中央通路地点 (通路幅は 40cm である) における A 層厚さの推定値を計算すると、エダマメ栽培区側 (中央通路の南側、 $X=680$) では 43.4cm

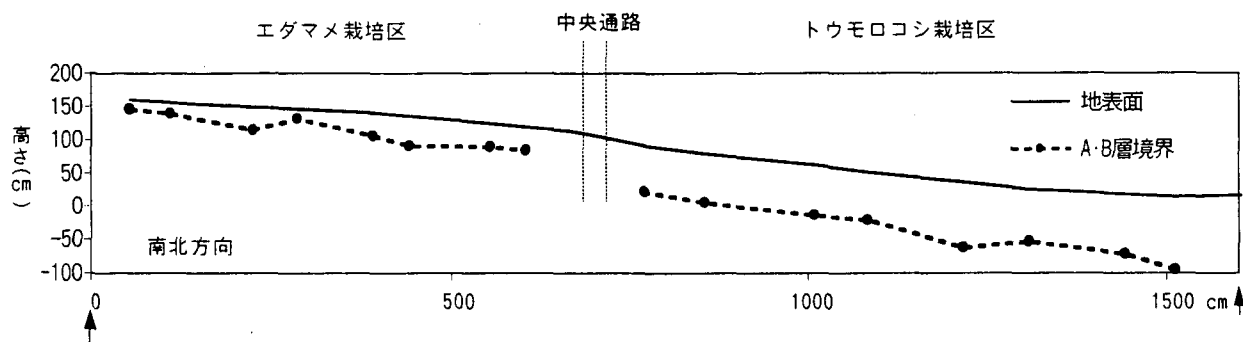


Fig. 9 圃場試験区南北方向(試験区 3~45)の縦断面図

The longitudinal section of the north-south line (test plot 3~45) in the test field

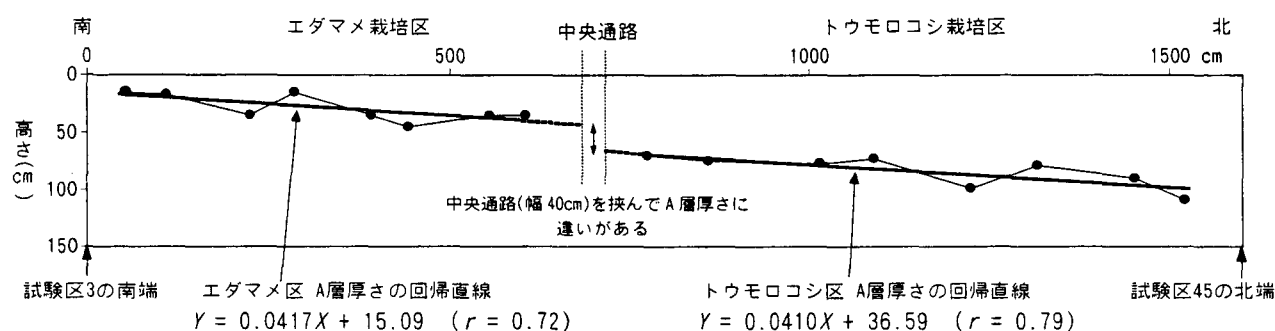


Fig. 10 南北方向(試験区 3~45)のA層厚さ

The depth of A soil layer in the north-south line (test plot 3~45)

であり、トウモロコシ栽培区側(中央通路の北側、 $X=720$)では66.1cmであった。両者には約22.7cmの差がある。エダマメ区とトウモロコシ区とはその長期栽培によって、表土の厚さ(A層厚)に差が生じてきたと判断される。

また Fig. 10 によると、エダマメ区・トウモロコシ区ともに、高位の南側より低位の北側の方がA層厚さが大きくなる傾向性が見られる。これは表土の慢性的な土壌侵食が生じているという見方を裏付ける証拠の一つと言えるであろう。

Table 3, Table 4, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 などに示されている両作物間の相違は、たとえば表土の慢性的な土壌侵食があったとしても、エダマメとトウモロコシの長期連続栽培によって根が及ぼした影響が確かに存在することを示すものと考察される。

5. おわりに

本報では、肥料三要素圃場試験区において、数種の施肥別、2種の作物別の土壌物理性の変化を、長谷川式土壌貫入計によって調査・検討した。この結果、エダマメ区とトウモロコシ区の同一作物間においては、施肥の種類別による差はあまり認められなかったが、エダマメ区とトウモロコシ区の異なる作物間では、差違が認められた。

土層の硬さは、長谷川式土壌貫入計では軟らか度で示されるのが普通であるが、筆者らは深さ10cm貫入するの

に必要とする打撃回数で、土層の硬さを表示することにした。長谷川式土壌貫入計の計測可能範囲は深度1mまでである。筆者らは地表から深度1mまでの総打撃回数と、深さ方向に10cm単位に分けた、各深度10cmあたりの打撃回数との両者について検討した。エダマメ区とトウモロコシ区との異なる作物間における差違は、深度1mまでの総打撃回数と深度10cm単位に分けた殆どの深さの打撃回数において、有意差が認められた。

肥料三要素圃場試験区における同一施肥・同一作物の長期連続栽培による土壌物理性の変化について、土層の硬さという視点から、長谷川式土壌貫入計を使用して、概括的な検討・研究を行った。本報で論述した調査・解析を通してある程度の傾向性は解明できたように考えられる。

謝辞：本報は明治大学科学技術研究所の総合研究で実施したものである。共同研究の本学専任教員各位、科学技術研究所の関係各位、農地環境工学研究室のゼミ生各位に対して、深甚なる謝意を表します。また本報の作成にあたり、作物の根群域との関係などについてご指導をいただいた本学の箱崎美義教授、今井勝教授に厚くお礼申し上げます。

引用文献

- 道路緑化技術基準改訂 W.G.(1988)：道路緑化技術基準・同解説、社団法人日本道路協会、p.307-308.
- 江崎要ら(1973)：乾燥の経年変化について 一八郎潟の市場乾燥に関する研究(Ⅳ)一、農土論集、45、p.6-11.

- 江崎要ら(2000): 黒ボク土畑地の表土厚さが土中水分変動に及ぼす影響 — 肥料三要素連続施用圃場試験区における調査・試験・研究(I) —, 農土論集, 208, p.145-153.
- 長谷川秀三ら(1981): 長谷川式土壌貫入計による緑化地の土壌調査 — 「軟らか度」の測定による土壌診断 —, 昭和 56 年度日本造園学会春季大会研究発表要旨.
- 住宅・都市整備公団(1989): 監督必携 土木工事 造園工事 監理編, 住宅・都市整備公団, p.848-850.
- 建設大臣官房官庁営繕部監修(1997): 建築工事管理指針 平成 9 年度版(下巻), p.636.
- 古賀汎(1969): 「土壌の物理性と植物生育」分担執筆, 養賢堂, p.12.
- 三好洋(1972): 根群発達の良好な土壌条件からみた畑地の有効土層の検討, 日本土壌肥科学雑誌, 43 (3), p.92-97.
- 千家正照(1998): 作土層の深さが降雨の保留・透水性に与える影響の解明, 畑地農業, 477, p.2-14.
- 田中典幸(1998): マメ類の根系, ダイス, 「根の事典」分担執筆, 朝倉書店, p.171.
- 戸澤秀男(1981): トウモロコシの栽培技術, 農山漁村文化協会, p.90.
- 渡邊千洋(2000): 黒ボク土畑地圃場における土層の硬さと透水性について — 肥料三要素連続施用試験圃場における調査・研究 —, 明治大学大学院農学研究科農学専攻 修士論文.
- 山中金次郎・松尾憲一(1962): 土壌硬度に関する研究(第 1 報), 土壌硬度と含水量との関係, 日本土壌肥科学雑誌, 33 (7), p.343-347.
- 山下正隆(1998): 根の多様性, 「根の事典」分担執筆, 朝倉書店, p.196.
- 柳澤剛ら(1999): 黒ボク土壌の土壌断面調査について — 肥料三要素連続施用が土壌物理性に及ぼす影響に関する研究(IV) —, 1999 年農土学会大会講演要旨集, p.780-781.

[2001. 3. 12. 受稿, 2001. 6. 26. 閲読]
 [この研究論文に対する公開の質疑あるいは討議(4,000字以内, 農業土木学会論文集編集委員会にて)は, 2002 年 2 月 24 日まで受付けます.]

On the Difference of Soil Layers Hardness Caused by the Several Kinds of Chemical Fertilizers and the Two Kinds of Crops

— The Observation, Experiment and Research in the Continuous Yearly Use Test Field of Three Major Nutrients of Chemical Fertilizers —

EZAKI Kaname*, WATANABE Chihiro**, YANAGISAWA Tsuyoshi*** and SHIZUKAWA Hidehiro***

*Faculty of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki 214-8571, JAPAN

**Daisen Co. Ltd., 20 Yanagime, Shimojichou, Toyohashi 440-0083, JAPAN

***Graduate School of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki 214-8571, JAPAN

Abstract

The transitions of soil physics caused by several kinds of chemical fertilizers and two kinds of crops in the continuous yearly use test field of the three major nutrients of chemical fertilizers were researched by a Hasegawa type soil penetration tester, paying attention to the hardness of the soil layers. The test crops are soybean and corn.

The hardness of the soil layers is shown commonly by the degree of softness in the case of a Hasegawa type soil penetration tester, but the writers indicated the necessary number of knocks (drops of a heavy plumb) to be penetrated at every ten centimeters depth of soil layer.

The number of knocks needed to penetrate soil layer from field surface to one meter depth, and at intervals of each ten centimeters of unit depth in the vertical direction of soil layer was examined by a statistical analysis.

As a result of these examinations, significant differences by several kinds of chemical fertilizers were not recognized within the same crop test fields, but were recognized between different crop test fields. It means that the differences of soil layer hardness are induced by the two different crops.

Key Words : Hardness of soil layer, Hasegawa type soil penetration tester, Yamanaka type soil hardness tester, Cone penetrometer, Test field of three major nutrients of chemical fertilizers, Kanto loam, Test of significant difference

化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に 及ぼす影響

竹迫 紘¹・三宅 亜弥¹・堀 水保^{1,2}

(2000年11月25日受理)

Effects of Long Term Chemical Fertilizer Application on the Chemical Properties of Andosols

Hiroshi TAKESAKO¹, Aya MIYAKE¹, Miho HORI^{1,2}

Summary

The chemical properties of the plot soils, soil solutions and uptake elements in green soybean and corn plants were examined under conditions of 24 years of consecutive and selective application of the three major elements with chemical fertilizers, but without liming. An important long-term effect of nitrogen fertilizer application has been a marked increase in the amount of acidification as the nitrogen fertilizer application rate increased. As a result of acidification, yields have progressively declined. We investigated some of the causes of degradation with the relationships between soil properties, soil solutions and uptake amount of elements by the plants. The results were summarized as follows.

- 1) The acidification of the soils is caused by the decrease of exchangeable cations, especially Ca and Mg. This decrease is proportional to the amount of nitrogen fertilizer applied.
- 2) Nitrate in soil solution is formed as an anion from the nitrification of nitrogen fertilizer (ammonium sulfate). Ca and Mg are released from the exchange site in the soil to the soil solution due to make an electrical balance against the concentration of nitrate in soil solution. The remaining (unabsorbed by plants) nitrate in the soil solution is leached out from the topsoil associated with the released Ca and Mg by rainwater. The amount of leaching Ca+Mg (the ratio is 7 : 1) corresponds to about 80% of the equivalent amount of nitrate in this experiment.
- 3) Accompanying the suppression of nitrification by the acidification of the soils, the concentration of nitrate that acts as a controller of the concentration of cationic elements in soil solutions is maintained at a very low level. So, the growth and production of plants are restrained by the low concentration of nitrate and other cationic elements in soil solutions.
- 4) The low yield of the plants increases the total amount of remaining nitrate source in the soils that acted as the accelerator of leaching of Ca and Mg from the soils, due to the decrease of the recovery rate of nitrogen fertilizer.

¹ 明治大学農学部 (〒214-8571 川崎市多摩区東三田 1-1-1)

² 現在) 東京農工大学大学院連合農学研究科 (〒183-8505 府中市幸町 3-5-8)

- 5) The results of the field experiments indicate that the concentration of P and K in the soils may also have been insufficient for optimum long-term plant growth, with soil P and K availability being less than the new standards that apply to Andosols.

I はじめに

窒素 (N), リン酸 (P_2O_5), カリ (K_2O) は作物の多量必須元素であり, 栽培作物には三要素として肥料の形態で施与される。三要素試験とはこれらの元素の施用量をコントロールし, 対象作物の生育や収獲物生産量に対する各元素の影響の解明や適正な施肥量の策定などの目的で行われるものである。本農学部南圃場においてトウモロコシとエダマメを対象とし, 1974年以降, 化学肥料のみを定量的に施用した20数年に及ぶ長期三要素試験圃場があり, これを対象とするプロジェクト研究として本学科学技術研究所の「総合研究」が1997年度より3ヵ年間実施された。本報は「総合研究」で実施した三要素の施肥の有無, 栽培作物の相異が処理区土壌の化学的性質に及ぼした影響の特徴とその要因について解析したものである。

II 試験・調査・分析方法

1. 圃場の設定と栽培概要

(1) 圃場の設定

本実験圃場は農学科における植物生産実習として設定・管理されてきたもので, エダマメ栽培区は無肥料区, 施肥の組み合わせ7種類の3反復, トウモロコシ栽培区は施肥の組み合わせ4種類の3反復で, それぞれ24試験区, 全体で48試験区から構成されている。区の配置を第1図に示した。図中の処理区名の N, P, K のイニシャルはそれぞれ窒素 (N), リン酸 (P), カリ (K) 肥料の施用の有無を表しており, たとえば P 区はリン酸肥料のみが施用されていることを示している。エダマメ栽培の O 区は無肥料区である。一区面積はエダマメが $1.65\text{ m} \times 5.0\text{ m}$ の 8.25 m^2 , トウモロコシが $2.25\text{ m} \times 5.0\text{ m}$ の 11.25 m^2 である。第1表に使用した肥料名とそれぞれの施用量を示した。

Table 1 Fertilizer and application amount (kg/10 a)

| fertilizer | green soybean | corn |
|-----------------------------|---------------|------|
| N (ammonium sulfate) | 6.0 | 27.0 |
| P_2O_5 (super phosphate) | 8.0 | 25.0 |
| K_2O (potassium chloride) | 12.0 | 19.0 |

化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響

(2) 栽培概要 (1998年度)

供試作物：エダマメ (白鳥枝豆) 75株/区

トウモロコシ (ハニーバンタム) 60株/区

栽培期間：施肥・播種 4月28日

エダマメ収穫 7月11日

トウモロコシ収穫 8月3日

2. 調査・分析方法

作物体・土壌溶液については1998年度の栽培試験を中心に調査・分析を行った。土壌の一般化学性については、1997年度にリン酸吸収係数、1998年に可給態リン酸、1999年にその他の分析を行った。分析に用いた試料は、リン酸吸収係数を除き、作物体分析との関連の必要性から1998年に採土した試料を用いた。

(1) 作物体：収量調査は第1図に示した試験区配置図中の○印を付けた各処理区から、平均的生育を示す3個体を選別し計測した。洗浄、裁断後、70℃で通風乾燥させ乾物率を測定した。

通風乾燥処理後、微粉碎し、硫酸一過酸化水素分解により溶液として、カルシウム (Ca) マグネシウム (Mg)、カリウム (K) は日立ゼーマン原子吸光分光光度計、リン (P) はバナドモリブデン法により島津 uv-vis. 分光光度計で測定した。全窒素 (T-N) は水蒸気蒸留法によった。

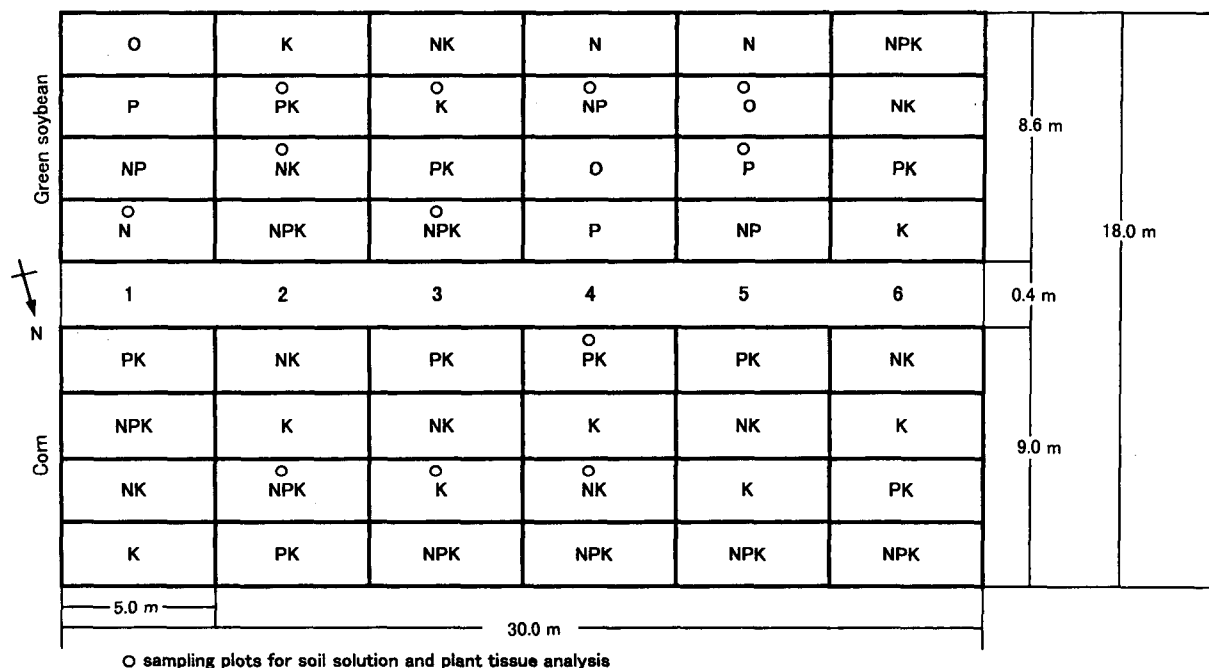


Fig. 1 Design of experimental field

(2) 土壌溶液：作物体を採取した処理区の約10 cm 深の表土をビニール袋で混合し、100 ml 採土管に充填後、遠心分離法により抽出した。Ca, Mg, K, Na は原子吸光法、アンモニア態窒素 ($\text{NH}_4\text{-N}$) はフローインジェクション法¹⁾、硝酸態窒素 ($\text{NO}_3\text{-N}$)、硫酸 (SO_4)、塩素 (Cl) イオンはイオンクロマトグラフ法により分析した。

(3) 土壌の一般化学性：48全処理区の約10 cm 深から採取した表土を風乾後、粉碎し、2 mm の篩を通過させ分析用試料とした。pH, 陽イオン交換容量 (CEC), 交換性 Ca, Mg, K, Na, トルオーグ法による可給態リン酸 ($\text{av-P}_2\text{O}_5$), リン酸吸収係数 (PAC) について分析を行った。分析法は土壌養分分析法²⁾に準じたが、各元素の定量について、陽イオンは原子吸光法、可給態リンおよびリン酸吸収係数は分光光度法によった。なお、上記、作物体、土壌溶液、土壌の一般化学性の分析繰り返しは3回とした。

III 結果および考察

1. 作物の収量・養分吸収量・三要素利用率

(1) エダマメ：10 a (アール：100 m²) 当たり新鮮全重、乾物率、乾燥重を第2表に示した。全重はNPK区が452 kg/10 a で以下PK, NP, N, Pの順でリンの施用が生育に与える影響が強いことが示されたが、新鮮子実重は全処理区ともに極めて貧弱で、正常な生育³⁾を示してはいなか

Table 2 Whole fresh matter yeild, dry matter rate, whole dry matter yeild

| plot | FMY kg/10 a | DMR % | DMY kg/10 a |
|---------------|----------------|----------|----------------|
| green soybean | | | |
| NP | 225.5 | 32.8 | 73.9 |
| N | 198.2 | 37.1 | 73.5 |
| P | 194.5 | 34.1 | 66.3 |
| O | 56.4 | 37.1 | 20.9 |
| NPK | 451.8 | 31.0 | 140.1 |
| NK | 118.2 | 33.4 | 39.5 |
| PK | 256.4 | 32.8 | 84.1 |
| K | 90.9 | 34.8 | 31.6 |
| corn | | | |
| NPK | 1468.3 | 19.5 | 286.3 |
| NK | 506.7 | 18.9 | 95.8 |
| PK | 1466.1 | 21.4 | 313.8 |
| K | 1029.9 | 18.5 | 190.5 |

FMY: whole fresh matter yeild

DMR: dry matter rate

DMY: whole dry matter yeild

化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響

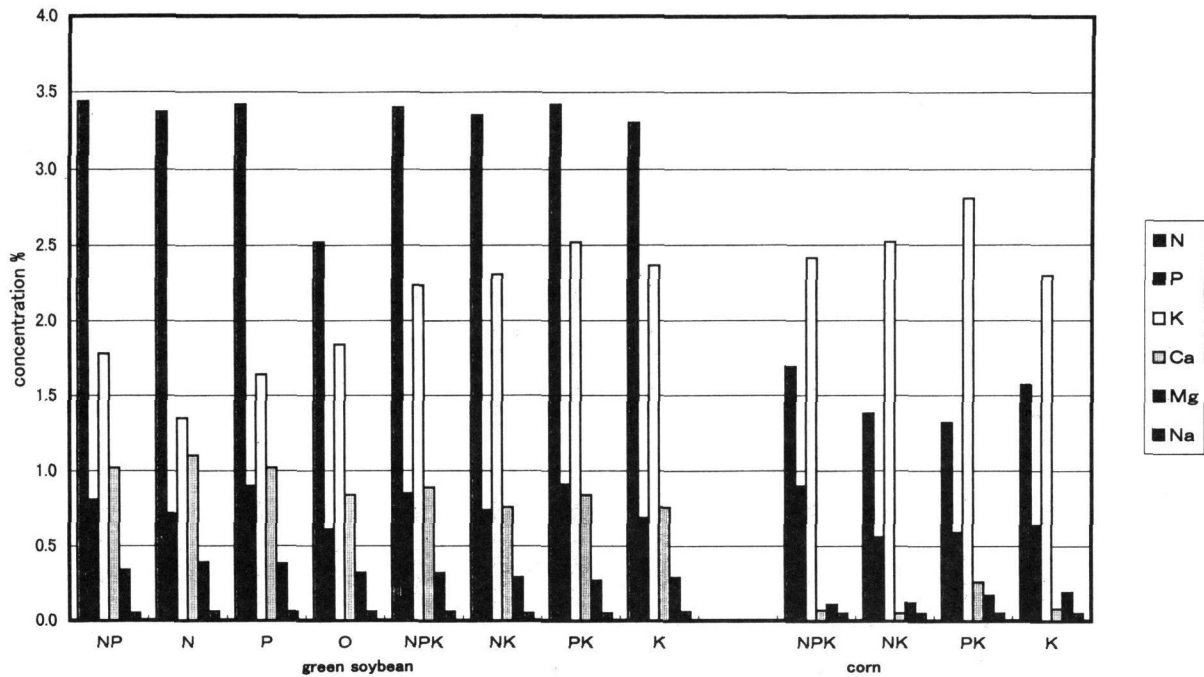


Fig. 2 Elements concentration in green soybean and corn

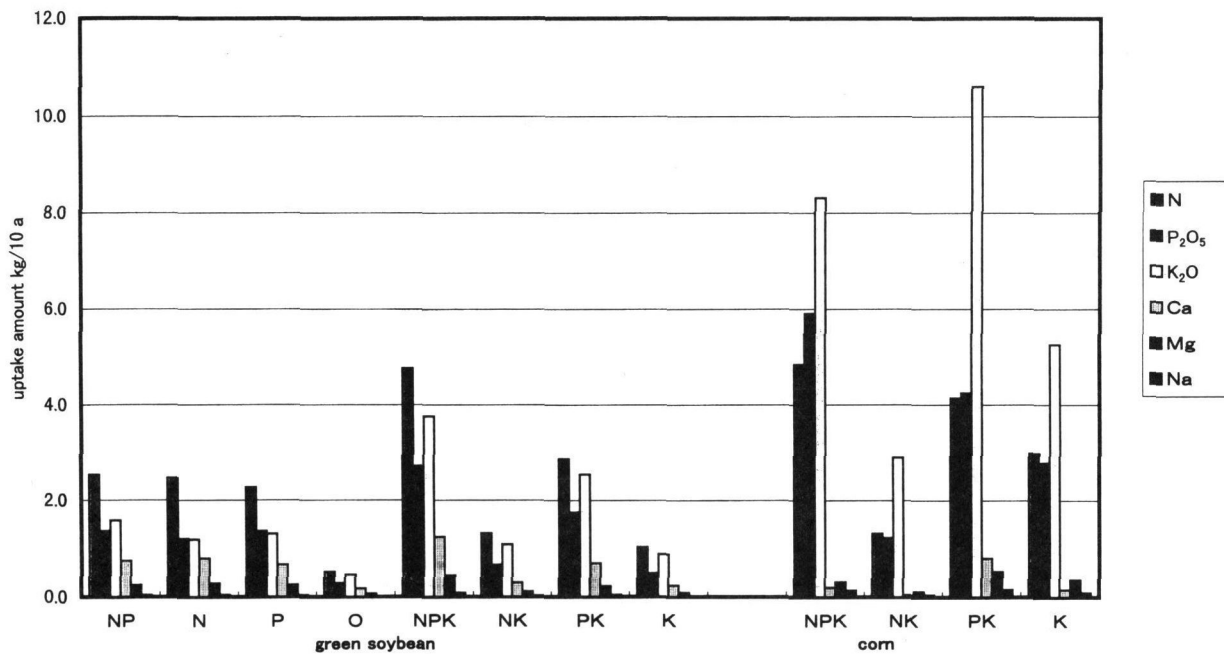


Fig. 3 Uptake amount of elements by green soybean and corn

った。乾物生産量はNPK区が140 kg/10 aで最も多く、全重と同様リン酸肥料施用区が高い傾向にあった。

各処理区のN, P, K, Ca, Mg, Naの含有率, 10 a当たりの吸収量, 10 a当たり施用した肥料中の要素量に対する10 a当たりの作物に吸収された要素量の比を百分率で示す肥料利用率を第2

Table 3 Element concentration, uptake amount, recovery rate of fertilizer

| plot | element concentration % | | | | | | uptake kg/10 a | | | | | | recovery rate % | | |
|---------------|-------------------------|------|------|------|------|------|----------------|-------------------------------|------------------|------|------|------|-----------------|-------------------------------|------------------|
| | N | P | K | Ca | Mg | Na | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | Ca | Mg | Na | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| green soybean | | | | | | | | | | | | | | | |
| NP | 3.44 | 0.81 | 1.78 | 1.02 | 0.34 | 0.05 | 2.54 | 1.37 | 1.59 | 0.75 | 0.25 | 0.04 | 42.4 | 17.2 | |
| N | 3.37 | 0.72 | 1.35 | 1.10 | 0.39 | 0.06 | 2.48 | 1.21 | 1.20 | 0.81 | 0.29 | 0.04 | 41.3 | | |
| P | 3.42 | 0.90 | 1.64 | 1.02 | 0.38 | 0.06 | 2.27 | 1.37 | 1.31 | 0.68 | 0.25 | 0.04 | | 17.1 | |
| O | 2.52 | 0.61 | 1.84 | 0.84 | 0.32 | 0.06 | 0.53 | 0.29 | 0.46 | 0.18 | 0.07 | 0.01 | | | |
| NPK | 3.40 | 0.85 | 2.23 | 0.89 | 0.32 | 0.06 | 4.76 | 2.73 | 3.76 | 1.25 | 0.45 | 0.08 | 79.4 | 34.1 | 31.4 |
| NK | 3.35 | 0.74 | 2.30 | 0.76 | 0.29 | 0.05 | 1.32 | 0.67 | 1.09 | 0.30 | 0.11 | 0.02 | 22.0 | | 9.1 |
| PK | 3.42 | 0.91 | 2.52 | 0.84 | 0.27 | 0.05 | 2.88 | 1.75 | 2.55 | 0.71 | 0.23 | 0.04 | | 21.9 | 21.3 |
| K | 3.30 | 0.69 | 2.36 | 0.76 | 0.29 | 0.06 | 1.04 | 0.50 | 0.90 | 0.24 | 0.09 | 0.02 | | | 7.5 |
| corn | | | | | | | | | | | | | | | |
| NPK | 1.69 | 0.90 | 2.41 | 0.07 | 0.11 | 0.05 | 4.84 | 5.90 | 8.31 | 0.20 | 0.31 | 0.14 | 17.9 | 23.6 | 43.7 |
| NK | 1.38 | 0.56 | 2.52 | 0.05 | 0.12 | 0.05 | 1.32 | 1.23 | 2.91 | 0.05 | 0.11 | 0.05 | 4.9 | | 15.3 |
| PK | 1.32 | 0.59 | 2.81 | 0.26 | 0.17 | 0.05 | 4.14 | 4.24 | 10.62 | 0.82 | 0.53 | 0.16 | | 17.0 | 55.9 |
| K | 1.57 | 0.64 | 2.29 | 0.08 | 0.19 | 0.05 | 2.99 | 2.79 | 5.26 | 0.15 | 0.36 | 0.10 | | | 27.7 |

図, 第3図および第3表に示した。リンの施用区は無窒素区でも窒素含有率が高く窒素の吸収を促進する傾向³⁾が見られた。また, リンの施用はP, Caの含有率が高くなる傾向³⁾が認められた。カリの施用は作物体のK含有率を明瞭に増大させた。また, 窒素とリンの間に0.723と比較的に高い相関係数が見られ, リンの吸収が窒素の吸収を促進させる作用があることを示した。また, 第4図に示すようにK含有率とCa, Mg含有率の間にはそれぞれ-0.861, -0.952の高いマイナスの相関が見られ, 1価のKと2価の両者のそれぞれに拮抗作用があることを明瞭に示した。また, CaとMgの吸収は拮抗せず, リンクしていることを示していた。

各元素の10aあたりの吸収量は乾物生産量に規制されるため各元素ともにNPK区が最も多く, PK, NPなどリン酸肥料施用区が高い傾向が認められた。無肥料区は乾物生産量が少ないため吸収量は少なかった。肥料の利用率は, 窒素についてNPK区が79%で比較的に高い値を示したが, 他区は22-42%で低かった。リン酸は17-34%と栽培作物としては比較的に高い値であった。カリは7.5-31%で栽培作物としては通常より低い値であった。

(2) トウモロコシ: 各処理区ともに生育は極めて貧弱で, 可食部は商品形として成熟したものは皆無であった。第2表に示したように, 新鮮物生産量はNPK区が最も多かったが, PK区に比較し乾物率が低かったため, 乾物生産量はPK区のほうが多い結果となった。NK区はK区より生産量が少なく, 窒素の施用よりリン酸の施用がエダマメと同様全体生産量に効果的であった。各元素含有率の処理区間差は明瞭でなかったが, 窒素含有率とP含有率の間には0.872の相関係数があり, リンの吸収が窒素の吸収を促進³⁾することがトウモロコシでも明瞭であった。エダマメでは明瞭であったKとCa, Mgの吸収における拮抗作用は認められなかった。10aあた

化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響

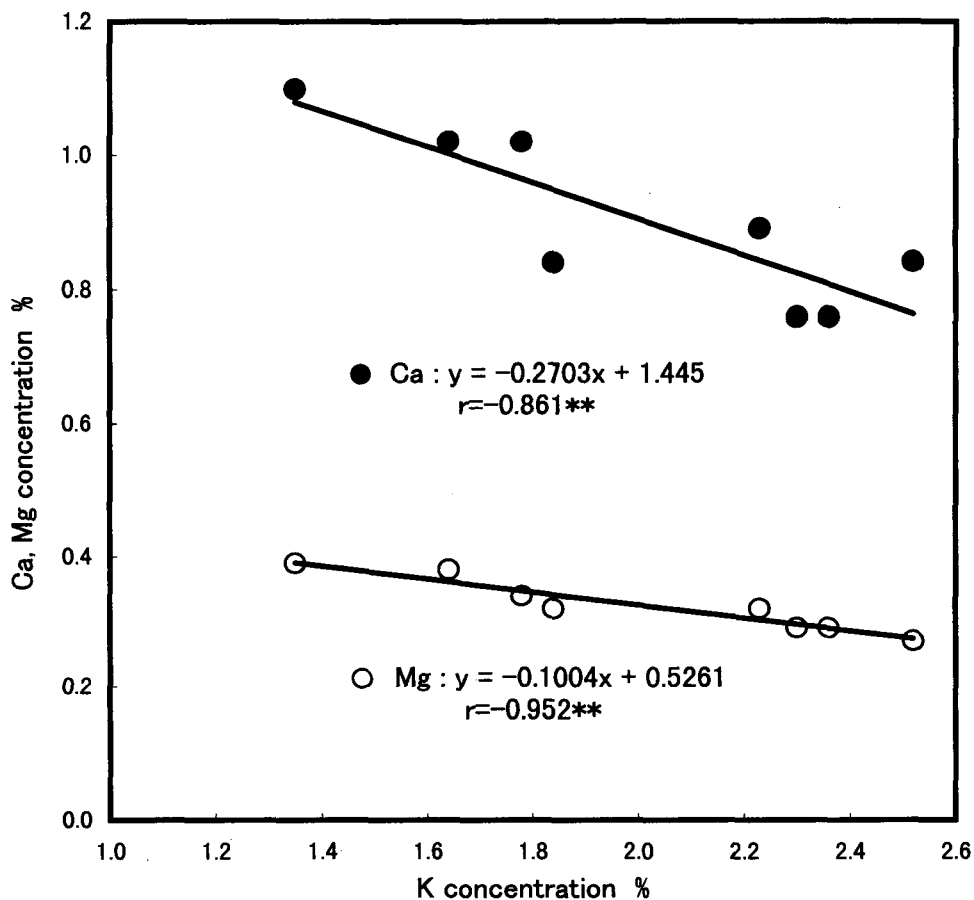


Fig. 4 Relation between K and Ca, Mg concentration in soybean dry tissue

りの各元素吸収量は乾物生産量の多かった NPK, PK 区が高かったが、肥料利用率は、低い乾物生産量を反映し、窒素について NPK 区が約18%と極めて低く、施与した窒素の多くが未利用であった。リン酸は17-24%, カリは15-56%とエダマメと同様、リン酸を除き通常より低い値であった。

Naは植物の多量必須元素ではない⁴⁾とされているように、両作物ともに0.05%程度と含有率が低く、処理区間にも差はなかった。また、10 aあたりの吸収量も他の元素より少なかった。

2. 土壌溶液

第1図中○印で示したエダマメ、トウモロコシ栽培各区の5月25日、6月20日、7月11日における土壌溶液の分析結果を第4表に示した。期日は施肥後、26日後、52日後、73日後で概ね栽培作物の生育初期、中期、後・晩期にあたる。

エダマメ区、トウモロコシ区に共通する土壌溶液分析結果の特徴は、全期間を通して、溶液濃度が極めて低いことである。通常の栽培作物で正常生育を示す土壌溶液濃度を電気伝導度 (EC) で見ると、6-8 mS/cm である⁵⁾のに対して、本研究での最も高い値はトウモロコシ NK 区、5

Table 4 Chemical properties of soil solutions

| plot | date | pH | EC μS/cm | cations me/l | | | | | anions me/l | | |
|---------------|----------|------|-------------|--------------|------|------|------|--------------------|--------------------|------|-----------------|
| | | | | Ca | Mg | K | Na | NH ₄ -N | NO ₃ -N | Cl | SO ₄ |
| green soybean | | | | | | | | | | | |
| NP | 25. May | 5.28 | 158 | 1.13 | 0.15 | 0.11 | 0.14 | 0.09 | 0.91 | 0.15 | 0.43 |
| | 20. June | 5.89 | 118 | 0.77 | 0.15 | 0.07 | 0.11 | 0.06 | 0.56 | 0.08 | 0.22 |
| | 11. July | 5.13 | 311 | 1.83 | 0.36 | 0.05 | 0.20 | 0.07 | 2.12 | 0.32 | 0.80 |
| N | 25. May | 5.72 | 208 | 0.91 | 0.18 | 0.12 | 0.22 | 0.44 | 0.62 | 0.11 | 0.84 |
| | 20. June | 5.22 | 257 | 1.57 | 0.34 | 0.10 | 0.17 | 0.13 | 1.97 | 0.12 | 0.87 |
| | 11. July | 5.13 | 182 | 1.14 | 0.24 | 0.05 | 0.15 | 0.07 | 0.98 | 0.09 | 0.19 |
| P | 25. May | 5.66 | 86 | 0.49 | 0.09 | 0.05 | 0.14 | 0.05 | 0.15 | 0.13 | 0.47 |
| | 20. June | 5.80 | 101 | 0.57 | 0.11 | 0.06 | 0.11 | 0.05 | 0.33 | 0.09 | 0.47 |
| | 11. July | 5.68 | 154 | 0.90 | 0.17 | 0.07 | 0.39 | 0.12 | 0.82 | 0.14 | 0.31 |
| O | 25. May | 5.82 | 68 | 0.28 | 0.08 | 0.07 | 0.13 | 0.06 | 0.17 | 0.14 | 0.21 |
| | 20. June | 6.04 | 67 | 0.11 | 0.12 | 0.09 | 0.18 | 0.06 | 0.23 | 0.10 | 0.22 |
| | 11. July | 5.34 | 115 | 0.57 | 0.16 | 0.08 | 0.13 | 0.07 | 0.67 | 0.08 | 0.14 |
| NPK | 25. May | 5.09 | 186 | 0.85 | 0.11 | 0.48 | 0.13 | 0.10 | 0.51 | 0.13 | 0.80 |
| | 20. June | 6.14 | 174 | 0.84 | 0.14 | 0.32 | 0.17 | 0.09 | 0.88 | 0.13 | 0.44 |
| | 11. July | 5.28 | 175 | 0.98 | 0.16 | 0.22 | 0.13 | 0.08 | 1.01 | 0.14 | 0.26 |
| NK | 25. May | 5.75 | 194 | 0.49 | 0.10 | 0.50 | 0.14 | 0.24 | 0.38 | 0.50 | 0.53 |
| | 20. June | 5.77 | 245 | 1.23 | 0.19 | 0.38 | 0.14 | 0.09 | 1.49 | 0.25 | 0.72 |
| | 11. July | 5.56 | 333 | 1.49 | 0.26 | 0.86 | 0.17 | 0.13 | 1.68 | 0.39 | 0.72 |
| PK | 25. May | 5.71 | 111 | 0.33 | 0.07 | 0.32 | 0.18 | 0.10 | 0.17 | 0.18 | 0.44 |
| | 20. June | 6.01 | 107 | 0.44 | 0.07 | 0.22 | 0.17 | 0.07 | 0.29 | 0.12 | 0.62 |
| | 11. July | 5.70 | 166 | 0.75 | 0.13 | 0.43 | 0.16 | 0.11 | 1.06 | 0.11 | 0.27 |
| K | 25. May | 5.29 | 98 | 0.37 | 0.10 | 0.30 | 0.41 | 0.07 | 0.17 | 0.45 | 0.24 |
| | 20. June | 5.88 | 64 | 0.09 | 0.08 | 0.11 | 0.14 | 0.07 | 0.28 | 0.12 | 0.20 |
| | 11. July | 5.43 | 143 | 0.52 | 0.12 | 0.37 | 0.20 | 0.08 | 0.84 | 0.18 | 0.14 |
| corn | | | | | | | | | | | |
| NPK | 25. May | 4.86 | 648 | 0.75 | 0.28 | 0.42 | 0.13 | 1.47 | 0.72 | 0.87 | 0.66 |
| | 20. June | 5.01 | 202 | 1.25 | 0.21 | 0.12 | 0.14 | 0.12 | 1.15 | 0.38 | 0.45 |
| | 11. July | 5.74 | 119 | 0.67 | 0.14 | 0.19 | 0.12 | 0.08 | 0.35 | 0.07 | 0.63 |
| NK | 25. May | 5.16 | 888 | 0.76 | 0.16 | 1.66 | 0.22 | 0.32 | 1.25 | 0.87 | 0.54 |
| | 20. June | 4.74 | 285 | 1.63 | 0.21 | 0.21 | 0.15 | 0.12 | 2.03 | 0.21 | 0.53 |
| | 11. July | 6.06 | 108 | 0.47 | 0.12 | 0.24 | 0.14 | 0.08 | 0.36 | 0.07 | 0.47 |
| PK | 25. May | 5.66 | 138 | 0.47 | 0.07 | 0.37 | 0.15 | 0.07 | 0.31 | 0.16 | 0.77 |
| | 20. June | 5.65 | 175 | 1.17 | 0.16 | 0.21 | 0.16 | 0.09 | 0.48 | 0.10 | 1.00 |
| | 11. July | 6.33 | 91 | 0.53 | 0.09 | 0.13 | 0.11 | 0.05 | 0.43 | 0.08 | 0.23 |
| K | 25. May | 5.53 | 111 | 0.21 | 0.07 | 1.01 | 0.24 | 0.08 | 0.30 | 0.13 | 0.69 |
| | 20. June | 5.54 | 122 | 0.32 | 0.11 | 0.27 | 0.12 | 0.10 | 0.50 | 0.12 | 0.29 |
| | 11. July | 6.31 | 129 | 0.38 | 0.13 | 0.27 | 0.13 | 0.13 | 0.43 | 0.08 | 0.28 |

化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響

月25日の0.89 mS とおおむね 1/10 程度である。この原因は、土壌の酸性化により硝化細菌の活動が抑制されアンモニア態窒素が硝酸態窒素に変換されなかったためと考えられる（後述）。この低い硝酸態窒素濃度が、現状において作物が通常の生育をしなかった主要原因の一つであると考えられる。

エダマメ区：施肥量がトウモロコシ区より少ないために溶液濃度は低かったが、処理区間では窒素施用区が無施用区より高く、窒素の施用が溶液濃度を高める要因であることがうかがえる。また、カリ肥料の施用区は無施用区より K 濃度が明らかに高い傾向が認められる。

元素間の動向を検討すると、全溶液濃度を表す EC（電気伝導度）は陽イオンの Ca, Mg と陰イオンの $\text{NO}_3\text{-N}$, SO_4 , Cl 濃度、特に $\text{NO}_3\text{-N}$ と高い相関があることが示されている。Ca, Mg などの陽イオンは陰イオン濃度に支配される^{5,6,7)}ので、エダマメ区の全土壌溶液濃度は、基本的には陰イオンである $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度に支配されている。このような理由から窒素（硫安）施用区が無施用区より溶液濃度が高く、また、第 5 図に示すように土壌溶液中の Ca, Mg 濃度と $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の間に、それぞれ 0.89, 0.92 の高い相関係数が存在するものと判断される。Ca と Mg の間には 0.91 の高い相関係数があり陽イオンの両者はリンクして変動しているが、同じ陽イオンの K と

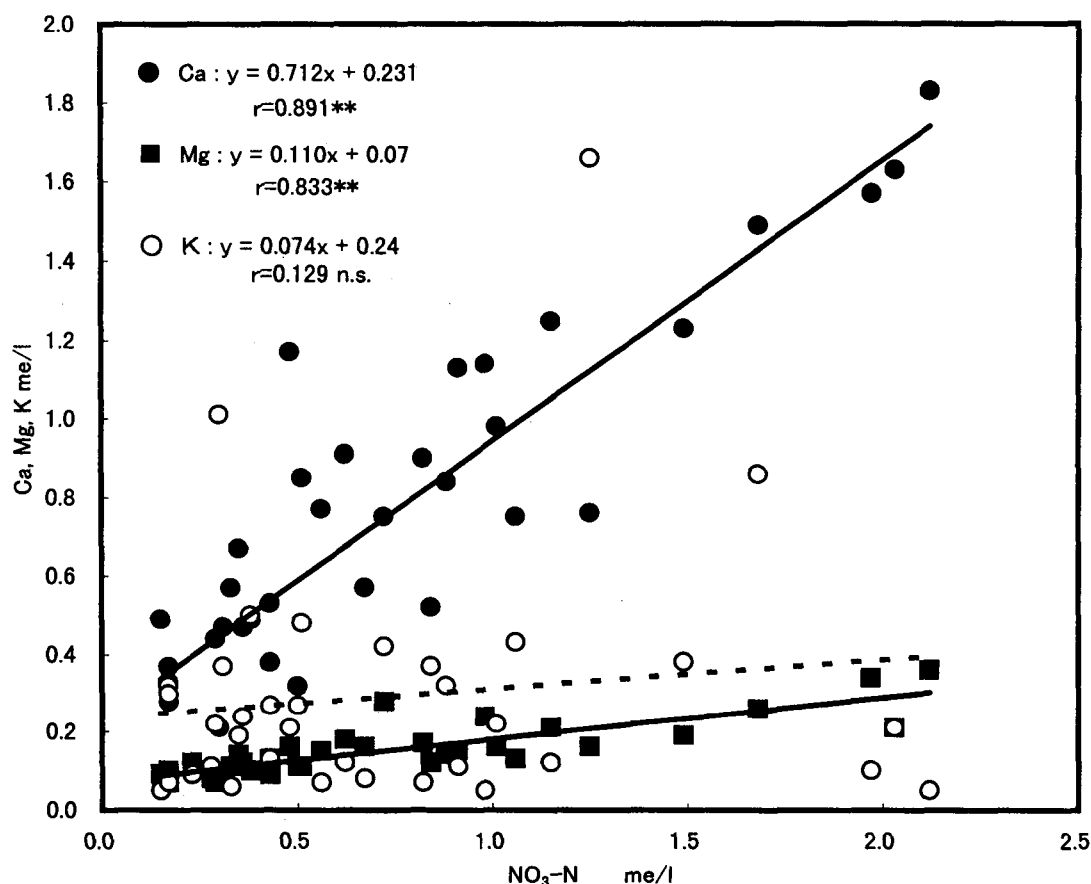


Fig. 5 Correlation between $\text{NO}_3\text{-N}$ and Ca, Mg, K concentration in all soil solution samples

は相関が見られない。この理由は、土壌溶液中の K 濃度はカリ肥料施与の有無が強く影響しているためと考えられる。

トウモロコシ区：エダマメ区と比較すると窒素施肥量が多いので、窒素施用区の EC はエダマメ区より高い値を示した。しかし、エダマメ区では $\text{NO}_3\text{-N}$ が EC 濃度を規制していたのに対して、トウモロコシ区は Cl 濃度との相関係数が高く、塩化カリに由来する Cl 濃度が全溶液濃度を規制していることを示した。この原因は、トウモロコシ区では土壌 pH が極端に低く、硝酸化細菌の働きがより強く抑制され、本来土壌溶液濃度を律する硝酸態窒素が土壌溶液中に生成される量が少いために生じたものと考えられる。加えて、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度が EC 値と比較的に高い相関係数を示すことは、硝酸化成を受けないアンモニアが Cl イオンの随伴陽イオンとして溶液中に放出されるためであろうと考えられる。また、エダマメ区では高い相関係数が見られた陰イオンの $\text{NO}_3\text{-N}$ と陽イオンの Ca, Mg との関係について、Ca とは 0.82 と比較的に高い相関係数が見られたが、Mg とは 0.61 と高くなく、 $\text{NH}_4\text{-N}$ が Mg を代償したものと考えられる。さらに、Cl と K の相関係数が高く、肥料として施与された塩化カリ (KCl) が、直接土壌溶液に溶解していることをうかがわせた。

溶液中の陽イオン、陰イオンのバランスは、極めて低濃度であったために誤差が大きく反映され、エダマメ区、トウモロコシ区ともにバラツキが大きかったが、全体を平均すると第 6 図に

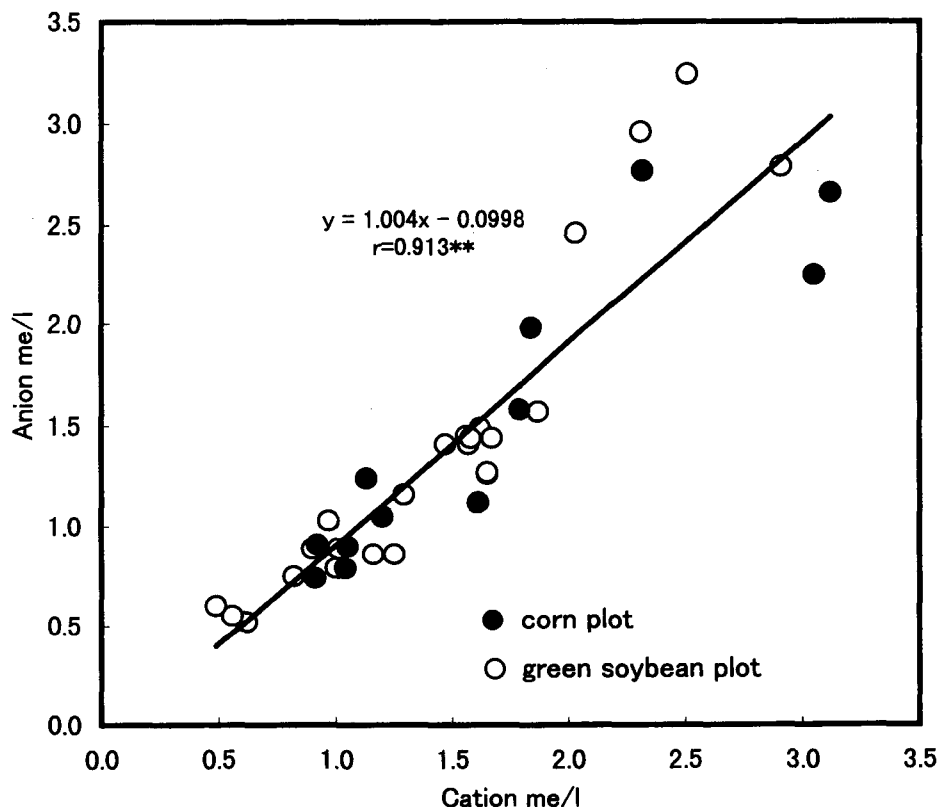


Fig. 6 Correlation between total cation and total anion concentration in soil solutions

化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響

Table 5 Chemical properties of plot soils

| plot | pH | | CEC cmol/kg | exchangeable cations cmol/kg | | | | BS % | available P ₂ O ₅ mg/100 g | PAC |
|---------------|------------------|------|----------------|------------------------------|------|------|------|---------|---|------|
| | H ₂ O | KCl | | Ca | Mg | K | Na | | | |
| green soybean | | | | | | | | | | |
| NP1 | 5.04 | 4.57 | 28.40 | 6.37 | 0.59 | 0.30 | 0.26 | 26.5 | 2.02 | 2230 |
| N1 | 4.87 | 4.41 | 28.64 | 4.29 | 0.60 | 0.31 | 0.37 | 19.5 | 1.64 | 2190 |
| P1 | 5.49 | 5.00 | 28.69 | 10.07 | 0.98 | 0.59 | 0.32 | 41.7 | 3.83 | 2192 |
| O1 | 5.51 | 5.04 | 27.16 | 7.21 | 1.29 | 0.82 | 0.25 | 35.3 | 0.96 | 2202 |
| NPK2 | 4.80 | 4.33 | 28.35 | 3.67 | 0.39 | 1.87 | 0.22 | 21.7 | 3.34 | 2176 |
| NK2 | 4.88 | 4.43 | 26.73 | 3.49 | 0.45 | 1.70 | 0.22 | 21.9 | 1.35 | 2193 |
| PK2 | 5.48 | 4.95 | 25.96 | 6.54 | 0.79 | 1.89 | 0.16 | 36.1 | 1.01 | 2221 |
| K2 | 5.66 | 5.11 | 25.39 | 5.88 | 0.46 | 1.84 | 0.35 | 33.6 | 0.83 | 2239 |
| NP3 | 5.19 | 4.73 | 26.10 | 6.46 | 1.39 | 2.38 | 0.20 | 39.9 | 2.41 | 2136 |
| NK3 | 5.13 | 4.94 | 22.66 | 3.38 | 0.66 | 1.51 | 0.21 | 25.4 | 0.58 | 2353 |
| PK3 | 5.37 | 4.90 | 26.63 | 6.59 | 0.79 | 1.93 | 0.31 | 36.1 | 1.55 | 2166 |
| K3 | 5.34 | 5.03 | 23.86 | 4.95 | 0.80 | 2.41 | 0.46 | 36.1 | 0.60 | 2277 |
| NP4 | 5.29 | 4.97 | 24.29 | 5.33 | 0.82 | 0.72 | 0.26 | 29.4 | 0.60 | 2292 |
| N4 | 5.01 | 4.83 | 22.42 | 4.17 | 0.88 | 1.12 | 0.27 | 28.7 | 0.60 | 2315 |
| P4 | 5.36 | 4.90 | 26.01 | 7.34 | 0.96 | 1.86 | 0.99 | 42.9 | 1.35 | 2165 |
| O4 | 5.13 | 4.82 | 25.48 | 5.67 | 0.82 | 0.72 | 1.30 | 33.4 | 0.97 | 2219 |
| NP5 | 5.27 | 4.88 | 26.10 | 7.47 | 0.68 | 0.33 | 0.82 | 35.6 | 2.54 | 2190 |
| N5 | 5.37 | 5.08 | 23.14 | 5.40 | 1.23 | 1.20 | 0.12 | 34.4 | 0.67 | 2263 |
| P5 | 5.55 | 5.12 | 23.67 | 7.68 | 1.01 | 0.64 | 0.25 | 40.5 | 1.35 | 2193 |
| O5 | 5.48 | 5.12 | 22.57 | 5.55 | 1.12 | 0.80 | 0.32 | 34.5 | 0.58 | 2289 |
| NPK6 | 5.25 | 5.09 | 19.94 | 3.81 | 0.49 | 1.07 | 0.35 | 28.7 | 0.67 | 2387 |
| NK6 | 5.17 | 5.06 | 20.13 | 2.99 | 0.46 | 0.99 | 0.27 | 23.4 | 0.49 | 2373 |
| PK6 | 5.57 | 5.16 | 22.33 | 6.29 | 0.58 | 1.51 | 0.93 | 41.7 | 1.35 | 2293 |
| K6 | 5.56 | 5.11 | 23.62 | 6.36 | 0.85 | 1.70 | 0.16 | 38.4 | 1.35 | 2194 |
| AVERAGE | | | | | | | | | | |
| all plots | 5.28 | 4.90 | 24.93 | 5.71 | 0.80 | 1.26 | 0.39 | 32.7 | 1.36 | 2239 |
| NP | 5.20 | 4.81 | 26.26 | 6.39 | 0.70 | 0.45 | 0.45 | 30.5 | 1.72 | 2237 |
| N | 5.08 | 4.77 | 24.73 | 4.62 | 0.90 | 0.88 | 0.25 | 27.5 | 0.97 | 2256 |
| P | 5.47 | 5.01 | 26.12 | 8.36 | 0.98 | 1.03 | 0.52 | 41.7 | 2.18 | 2183 |
| O | 5.37 | 4.99 | 25.07 | 6.14 | 1.08 | 0.78 | 0.62 | 34.4 | 0.84 | 2237 |
| NPK | 5.08 | 4.77 | 24.80 | 4.98 | 0.52 | 1.09 | 0.46 | 28.7 | 2.18 | 2251 |
| NK | 5.06 | 4.86 | 23.33 | 3.96 | 0.71 | 1.30 | 0.20 | 26.6 | 0.84 | 2276 |
| PK | 5.47 | 5.08 | 23.99 | 6.84 | 0.79 | 1.35 | 0.45 | 39.4 | 1.24 | 2236 |
| K | 5.52 | 5.11 | 23.86 | 5.93 | 0.81 | 1.45 | 0.28 | 35.5 | 0.92 | 2241 |
| corn | | | | | | | | | | |
| NPK1 | 4.30 | 4.02 | 30.55 | 3.33 | 0.26 | 1.72 | 0.27 | 18.3 | 9.72 | 2136 |
| NK1 | 4.18 | 3.98 | 30.17 | 1.68 | 0.24 | 1.15 | 0.25 | 11.0 | 7.14 | 2077 |
| PK1 | 5.09 | 4.74 | 32.46 | 11.99 | 0.60 | 3.08 | 0.21 | 48.9 | 26.24 | 2166 |
| K1 | 4.78 | 4.29 | 30.55 | 7.67 | 0.92 | 2.60 | 0.25 | 37.4 | 6.59 | 1979 |

Table 5 Chemical properties of plot soils (continued)

| plot | pH | | CEC cmol/kg | exchangeable cations cmol/kg | | | | BS % | available P ₂ O ₅ mg/100 g | PAC |
|-----------------|------------------|------|----------------|------------------------------|------|------|------|---------|---|------|
| | H ₂ O | KCl | | Ca | Mg | K | Na | | | |
| corn(continued) | | | | | | | | | | |
| NPK2 | 4.20 | 3.94 | 30.79 | 5.60 | 0.28 | 1.20 | 0.37 | 24.2 | 19.25 | 2045 |
| NK2 | 3.97 | 3.84 | 28.16 | 0.73 | 0.66 | 2.19 | 0.48 | 14.5 | 2.99 | 2264 |
| PK2 | 4.84 | 4.26 | 29.98 | 4.99 | 0.52 | 2.25 | 0.20 | 26.5 | 15.43 | 1930 |
| K2 | 4.70 | 4.14 | 28.59 | 2.25 | 0.47 | 2.11 | 0.36 | 18.1 | 5.51 | 2030 |
| NPK3 | 4.47 | 4.05 | 29.26 | 3.53 | 0.46 | 1.13 | 0.16 | 18.0 | 11.10 | 1979 |
| NK3 | 4.40 | 4.05 | 28.88 | 3.59 | 0.49 | 2.01 | 0.20 | 21.8 | 6.75 | 2088 |
| PK3 | 5.48 | 4.70 | 29.93 | 4.41 | 0.62 | 2.26 | 0.16 | 24.9 | 16.11 | 2037 |
| K3 | 4.72 | 4.20 | 28.16 | 2.38 | 0.53 | 2.20 | 0.34 | 19.3 | 5.52 | 1995 |
| NPK4 | 4.08 | 3.96 | 27.35 | 2.18 | 0.33 | 1.18 | 0.21 | 14.3 | 9.71 | 2078 |
| NK4 | 4.16 | 4.02 | 26.01 | 2.38 | 0.68 | 1.78 | 0.19 | 19.3 | 4.17 | 2203 |
| PK4 | 5.42 | 4.95 | 27.92 | 9.71 | 0.83 | 1.75 | 0.27 | 45.0 | 10.15 | 2098 |
| K | 5.58 | 4.92 | 28.26 | 7.27 | 0.94 | 3.93 | 0.16 | 43.5 | 6.62 | 2032 |
| NPK5 | 4.50 | 4.21 | 25.96 | 2.44 | 0.33 | 1.44 | 0.36 | 17.6 | 6.09 | 2134 |
| NK5 | 4.31 | 4.17 | 25.05 | 3.29 | 0.54 | 1.88 | 0.19 | 23.5 | 4.01 | 2277 |
| PK5 | 5.48 | 5.05 | 28.06 | 10.81 | 0.71 | 2.25 | 0.21 | 49.8 | 15.04 | 2142 |
| K5 | 5.06 | 4.55 | 25.77 | 3.03 | 0.62 | 2.92 | 0.20 | 26.3 | 3.45 | 2138 |
| NPK6 | 4.66 | 4.33 | 26.82 | 4.06 | 0.36 | 1.63 | 0.17 | 23.2 | 8.06 | 2144 |
| NK6 | 4.32 | 4.21 | 23.14 | 2.72 | 0.53 | 2.02 | 0.16 | 23.5 | 1.38 | 2378 |
| PK6 | 5.36 | 4.83 | 26.49 | 6.91 | 0.86 | 1.94 | 0.68 | 39.3 | 5.38 | 2107 |
| K6 | 4.98 | 4.59 | 24.43 | 2.88 | 0.48 | 2.53 | 0.51 | 26.2 | 1.88 | 2220 |
| AVERAGE | | | | | | | | | | |
| all plots | 4.71 | 4.33 | 28.03 | 4.58 | 0.55 | 2.05 | 0.27 | 26.4 | 8.68 | 2112 |
| NPK | 4.37 | 4.09 | 27.97 | 3.52 | 0.34 | 1.38 | 0.26 | 19.3 | 10.7 | 2086 |
| NK | 4.22 | 4.05 | 26.90 | 2.40 | 0.52 | 1.84 | 0.25 | 18.9 | 4.4 | 2215 |
| PK | 5.28 | 4.76 | 29.14 | 8.14 | 0.69 | 2.26 | 0.29 | 39.1 | 14.7 | 2080 |
| K | 4.97 | 4.45 | 27.63 | 4.25 | 0.66 | 2.72 | 0.30 | 28.5 | 4.9 | 2066 |

BS: base saturation

available P₂O₅: Trough method

PAC: Phosphate adsorption coefficient

示すように理論どおりおおむね等量になっていた。

3 一般化学性

一般化学性の分析結果を第5表に示した。

(1) pH

エダマメ栽培区: pH(H₂O) は4.8-5.7の範囲, pH(KCl) は4.3-5.1の範囲で作物栽培の一般的診断基準値⁸⁾である pH(H₂O)6.5より低く, 化学肥料の連用による酸性化が進行していた。各

化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響

処理内間では窒素肥料施用区 (NPK, NK, NP, N) が窒素肥料無施用区より有為に (分散分析: 危険率 1%) に低く, 窒素肥料の施肥が土壌の酸性化の進行に関与していることが示された。pH(KCl) も同様の傾向が認められたが処理区間の統計的有為は示されなかった。

トウモロコシ栽培区: pH(H₂O) は 4.0–5.6, pH(KCl) は 3.8–5.1 の範囲でエダマメ栽培区よりも顕著に酸性化していた。処理区間では NK 区, NPK 区の順に低く, エダマメ栽培区と同様に窒素肥料施用区 (NPK, NK) が窒素無施用区 (PK, K) より統計的に低く, 窒素肥料の施用が酸性化を促進させていることが明瞭に示されたが, 特に PK は平均値で 5.3 と K の 5.0 より高く, リン酸の施用は pH の低下を抑制している傾向が認められた。pH(KCl) も同様の傾向であるが, エダマメ栽培区で認められなかった統計的有意が認められた。この極めて低い土壌 pH が, 本試験圃場で栽培作物が通常の生育を示さなかった主要因の一つであると判断される。

エダマメ栽培区とトウモロコシ栽培区を比較すると 1% 危険率により pH(H₂O), pH(KCl) ともにトウモロコシ区が低かった。土壌の pH は, 第 5 表より作成した第 7 図に示すように原理的に塩基飽和度に規制されていることが知られている⁷⁾が, 第 8 図に示した相関係数から想定されるように, 塩基飽和度は交換性 Ca に強く依存することから, 両栽培区の低い pH や処理区

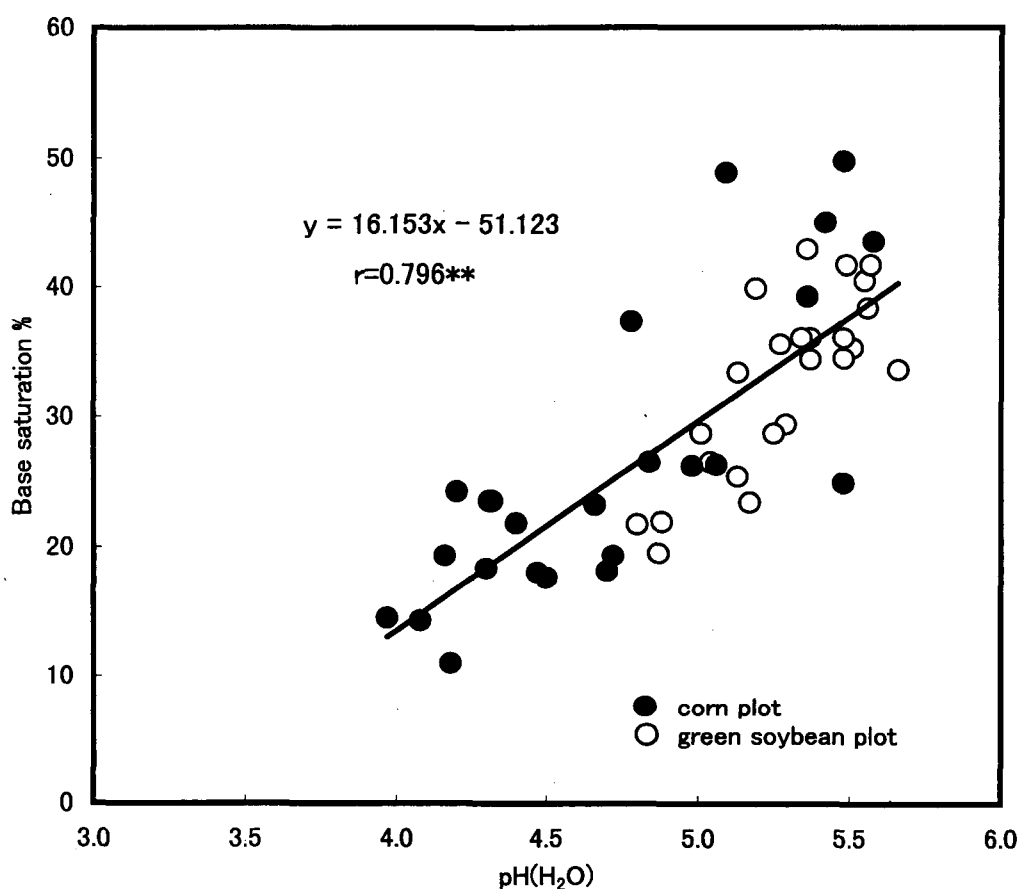


Fig. 7 Correlation between pH(H₂O) and base saturation

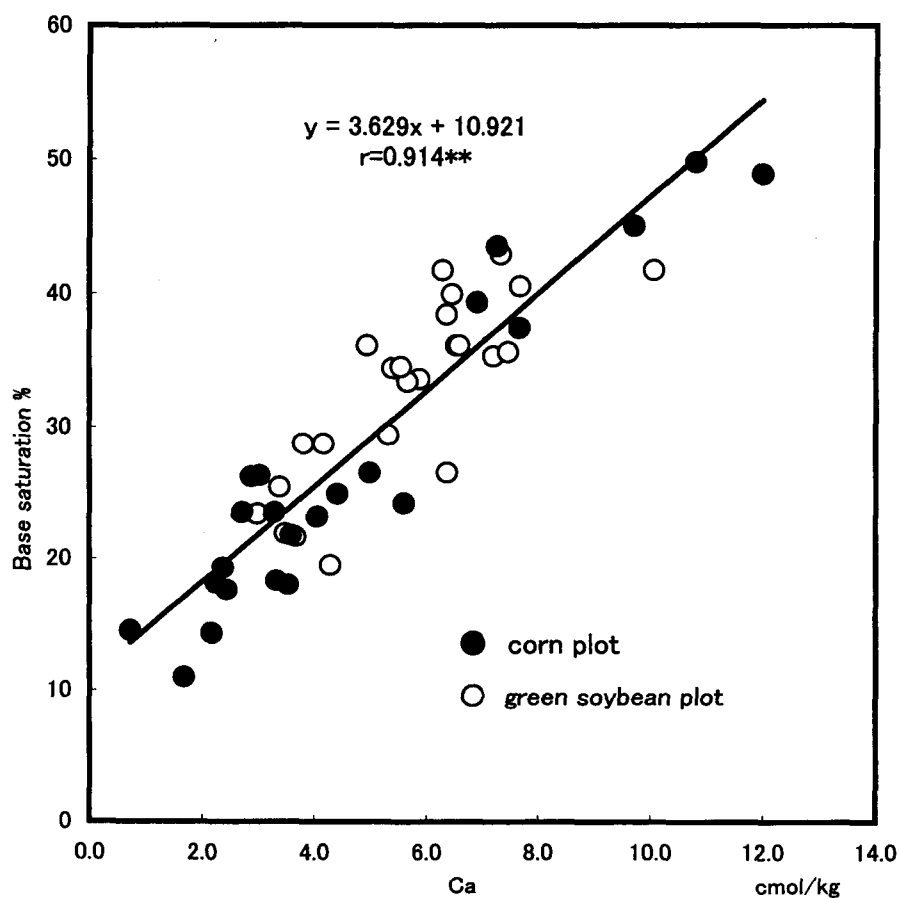


Fig. 8 Correlation between base saturation and exchangeable Ca

間差は、交換性 Ca の減少や交換性 Ca 含量あるいは Ca 飽和度（後述）の差に規定されていると判断される。

(2) 陽イオン交換容量 (CEC)

エダマメ栽培区：全平均値は24.9 cmol/kg で、一般的な黒ボク土壌の値を示した。処理区間差は NP, P 区が多少高い傾向があったが、統計的有意差は認められなかった。また、分散分析においてブロック間に統計的有意差が認められ、試験区の東側から西側に向かい低下する傾向があることが明らかになった。

トウモロコシ栽培区：全平均値は28.0 cmol/kg であるが、PK; 29.1, NPK; 28.0 と NK26.9, K; 27.6 cmol の間には統計的有意差があり、既報告^{9,10,11)}と同様に P の施用により CEC が増大することが認められた。また、エダマメ栽培区と同様にブロック間に有意差があり、東側から西側に向かい低くなる傾向が示された。

(3) 交換性カルシウム (Ca)

エダマメ栽培区：全平均値は5.71 cmol/kg であり、この数値より窒素施用の N, NP, K, NK が低く、窒素の施用は交換性 Ca を減少させる作用があることを示した。一方、P, PK など、過リ

化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響

ン酸石灰の施用区は交換性 Ca が高かった。過リン酸石灰はリン酸 1 石灰と硫酸カルシウムの混合物であり、CaO として約29%を含む⁴⁾。そのため、過リン酸石灰施用区において交換性 Ca が多くなったものと判断される。過リン酸石灰の施用、無施用の処理区間には統計的有意差が認められた。

トウモロコシ栽培区：エダマメ区同様に NPK, NK の窒素施用区が過リン酸石灰施用の PK 区より統計的に低く窒素の施用が交換性 Ca の減少の要因であることがうかがわれた。エダマメ区と同様、窒素施用区とリン酸施用区の間に統計的有意差が認められた。

エダマメ栽培区とトウモロコシ栽培区ではトウモロコシ栽培区のほうが明らかに含量が少なかったが、処理区間の分散が大きく 5%危険率では統計的有意差は認められなかった。

CEC に対する交換性 Ca の百分率である Ca 飽和度は、処理区を平均するとエダマメ区23%、トウモロコシ区16%であり、土壌診断基準値の50%¹²⁾を大きく下回っていた。

(4) 交換性マグネシウム (Mg)

エダマメ栽培区：平均値は0.8 cmol/kg で、窒素施用区はこれより低い値を示し、窒素の施用が交換性 Mg を減少させることが判明した。しかし、区間の分散分析では統計的有意差は認められず交換性 Ca よりも窒素施用による減少は小さいものと判断された。

トウモロコシ栽培区：エダマメ区と同様、窒素施用区、特に NPK 区が他区とは統計的有意差が生じるほど低かった。しかし、NK 区は有意差がないことから、NPK 区においてはトウモロコシによる Mg 吸収量が多いために、土壌中の Mg の減少が促進されたものと判断された。

エダマメ区とトウモロコシ区ではトウモロコシ区の方が統計的有意差を持ち低かった。この原因はトウモロコシ区の方が窒素肥料の施用量が多いこととトウモロコシの Mg 吸収量が多いためと考えられた。また、両区の Mg 飽和度はそれぞれ3.2%, 1.9%であり、Ca と同じ様に土壌診断基準値の10%¹²⁾を大幅に下回っていた。

(5) 交換性カリウム (K)

エダマメ栽培区：カリ肥料施用区が無施用区より統計的有意差を持ち高く、交換性 K 含量がカリ肥料の施用により富化されることが示された。また、カリ無施用区内、カリ施用区内を問わず窒素施用区は低い傾向があり、窒素の施用によって交換性 K も減少することが示された。

トウモロコシ区：トウモロコシ区は全処理区にカリ肥料が施用され、また、その施用量が多いのでエダマメ栽培区のカリ肥料施用区より高い値を示した。加えて、エダマメ区と同様に窒素施用区は統計的に低く、窒素の施肥が交換性 K の減少の要因となることが示された。両栽培区ともにカリ肥料施用区の K 飽和度はそれぞれ5.4%, 7.3%であり、土壌診断基準値の5%¹²⁾に概ね適合していた。

(6) 交換性ナトリウム (Na)

エダマメ、トウモロコシ区共に過リン酸石灰や塩化カリの施用区が高い傾向があり、これらの

肥料の不純物として交換性 Na を多少増加させたと考えられたが、前述のように作物による面積あたりの吸収量が少ないことも作用し、各処理区間差はエダマメ、トウモロコシ区共に統計的に有意でなかった。

(7) 可給態リン酸

エダマメ栽培区：過リン酸石灰施用区が無施用区に比較し統計的有意差を持って高い値を示したが、施用区においても 2 mg/100 g 程度で、生産力可能性分級基準値¹³⁾の要因強度 3、すなわち「土壌悪化の危険性のかなり大きい土壌」に分級される含量であった。この低い可給態リン酸含量が本試験区において通常の生育を示さなかった主要因の一つと考えられる。

トウモロコシ栽培区：リン酸肥料の施用量が多いので、施用区は最低 5.4 mg、最高 26 mg、平均 12.7 mg で統計的有意差を持ってエダマメ栽培区より高かった。可給態リン酸の適正水準に関する近年の研究では、多くの栽培作物の最大収穫量は 120 mg 前後に見られることや、この値からの土壌診断基準値は 40–50 mg が妥当との見解¹⁴⁾が示されているが、これに比較すると本試験圃場のリン酸含量は極めて低い状態であり、これがエダマメと同様に低生育の要因の一つと判断される。

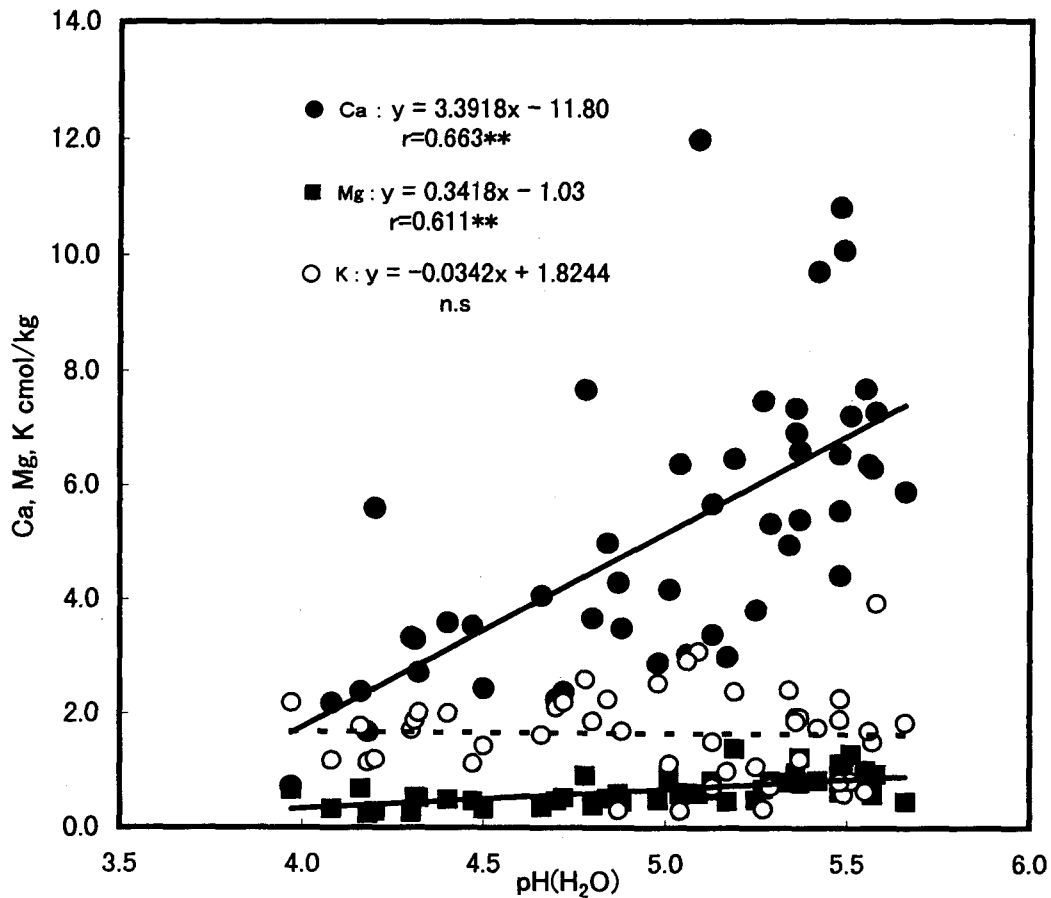
(8) リン酸吸収係数

土壌へのリン酸の吸着は遊離のアルミニウムや鉄との不可逆的結合によって起こり、特に遊離アルミニウムの多い黒ボク（火山灰）土壌はこの値が高いことが知られている。全区ともに 2000 以上を示し、本試験圃場が黒ボク土壌の典型的特徴を持っており、施用したリン酸肥料が不可給態化する傾向の強い土壌であることを示した。本試験圃場ではエダマメ、トウモロコシ栽培それぞれの区間内に統計的有意差はなかったが、トウモロコシ区の方がエダマメ区より統計的有意差を持ち低かった（後述）。

(9) 一般化学性の相互関係

一般化学性各項目間の相関係数を検討してみると、 $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ と $\text{pH}(\text{KCl})$ は溶液を変えた同じ測定項目であるので 0.95 の高い相関係数が得られるのは当然であるが、これ以外のいくつかの測定項目間に比較的に高い相関係数が存在する。第 7、第 8 および第 9 図に示すように $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ 、交換性 Ca、交換性 Mg、塩基飽和度のそれぞれの間には 0.61–0.91 の比較的に高い相関係数が存在している。この関係は土壌化学的には、「土壌の pH は塩基飽和度により規制され、その塩基飽和度は塩基類のうち構成割合の多い Ca, Mg 含量に依存する」という基本的法則性を示している。すなわち、本試験圃場が正常な生育を阻害するような低い pH を示した要因は、交換性 Ca, Mg の土壌からの減少によると判断される。また、CEC と可給態リン酸含量に正の相関（第 10 図）、CEC とリン酸吸収係数とは負の相関、可給態リン酸とリン酸吸収係数は負の相関（第 11 図）が見られる。これらの関係から、リン酸肥料の施用により土壌中に富化されたリン酸は可給態リン酸を増加させるばかりでなく、遊離アルミニウムとの結合に起因し発生する陰荷電に

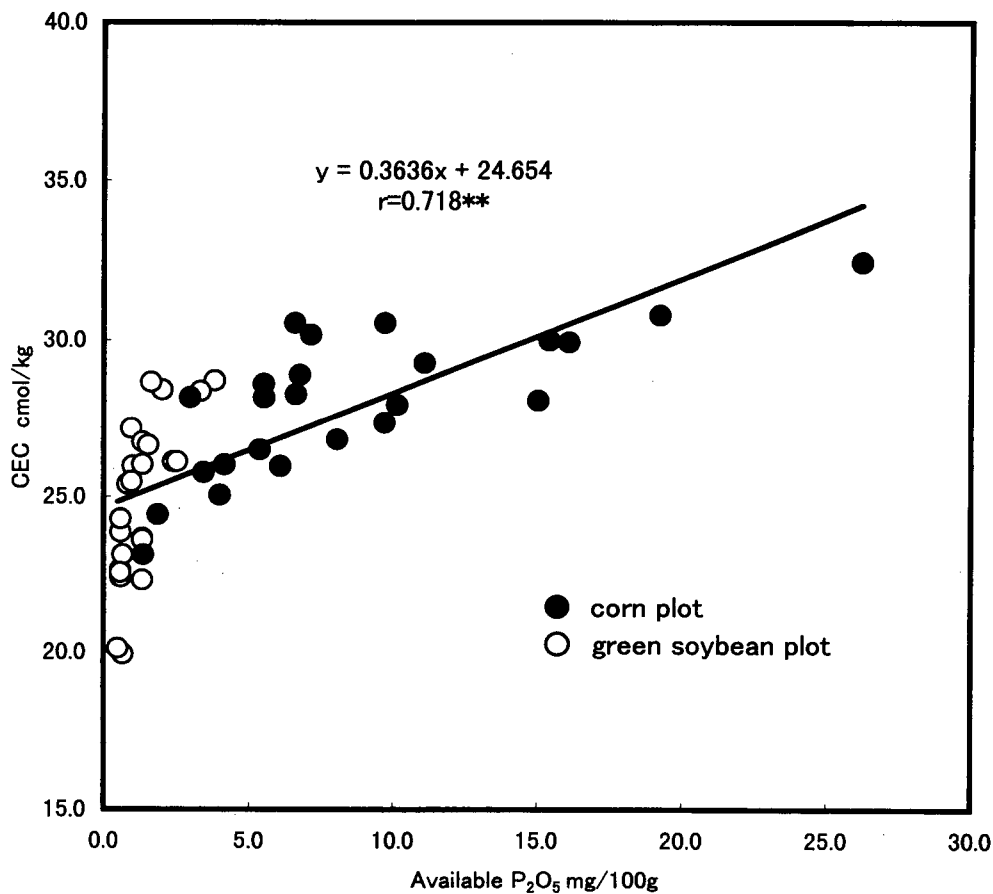
化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響


 Fig. 9 Correlation between $\text{pH}(\text{H}_2\text{O})$ and exchangeable Ca, Mg, K in all plot soils

より CEC を増大させ^{9,10,11)}，加えてリン酸吸収係数を軽減する役割があることを示している。ただし，CEC とリン酸吸収係数の逆相関は間接的である。この機構は，前述したエダマメとトウモロコシ栽培区間の CEC，可給態リン酸，リン酸吸収係数に統計的有意差が存在する原因である。すなわち，トウモロコシ区はエダマメ区に比較しリン酸肥料施用量が多いので，トウモロコシ区においてリン酸が蓄積し，可給態リン酸の増大，CEC の増大，リン酸吸収係数の低下により顕著に生じたものと理解される。

IV 総 合 考 察

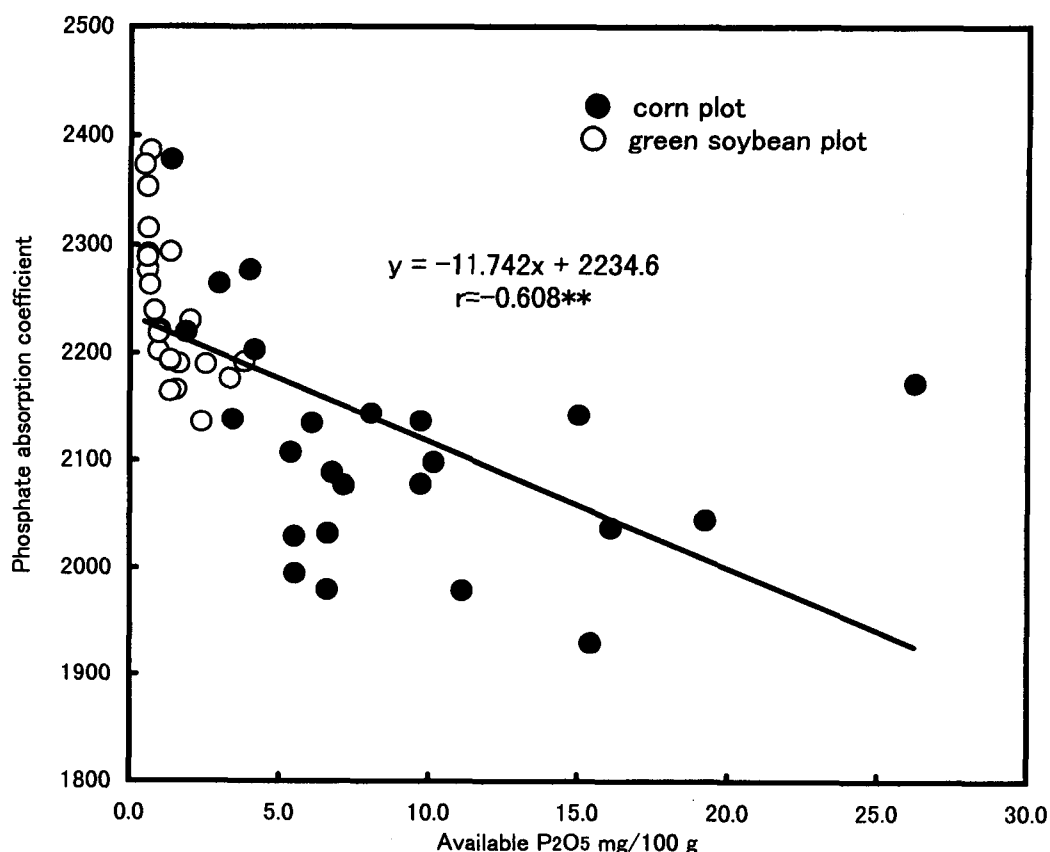
20数年にわたる化学肥料のみの栽培管理により，本試験圃場土壌には交換性 Ca, Mg が減少し，これが原因し pH の著しい低下が生じていた。また，土壌の酸性化は硝酸化成菌の活動を抑制するため，土壌溶液において溶液濃度あるいは陽イオン濃度をコントロールする陰イオンとしての硝酸態窒素濃度が上昇せず，土壌溶液濃度中の各元素濃度を作物の養分要求濃度より低く推移させていた。このことが本試験区において作物の生育が著しく抑制された主要因の一つであ

Fig. 10 Correlation between available P_2O_5 and CEC

る。その他、可給態リン酸の低さや土壌の酸性そのものが作物の生育を抑制したものと考えられる。本項では試験圃場で起きた土壌の酸性化を施肥量、作物による吸収量、土壌からの溶脱の観点から考察する。

土壌の酸性化、すなわちそれを最も強く規定する交換性 Ca, Mg の減少は、作物間ではトウモロコシ栽培区、処理区間では窒素施用区で著しく進行していることを前述した。トウモロコシ区とエダマメ区の窒素施用区におけるこれに関連する主な要因は、窒素肥料施用量と窒素利用率、作物による Ca, Mg 吸収量である。作物による単位面積あたりの元素の吸収量は生産量が反映されるため、正常な生育・生産をしていない現状での限られた考察となってしまうが、トウモロコシはエダマメより Ca, Mg 吸収量が少なく、作物によるこれらの吸収が現時点では土壌中の交換性 Ca, Mg 減少の主要因とは言いがたい。しかし、作物体元素含量と土壌分析項目の関係から、トウモロコシの Ca, Mg 含有率は交換性 Ca, Mg と相関が高いので、交換性 Ca, Mg 含量が高く、正常な収穫量が得られる場合は、多量の交換性 Ca, Mg がトウモロコシに吸収され、土壌中のこれらの著しい減少が起きることが想定される。本試験の開始期はそのような機構で交換性 Ca, Mg の減少が進行したものと考えられる。また、窒素無施用区においても20数年にわたる栽

化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響


 Fig. 11 Correlation between available- P_2O_5 and phosphate absorption coefficient

培期間中に、交換性 Ca, Mg の減少による酸性化は進行している。これは土壌腐植より由来する土壌窒素の無機化とともに、トウモロコシによる土壌中の Ca, Mg 吸収の積み重ねが反映しているものと考えられる。

エダマメ栽培区においては Ca 吸収量が多い区の交換性 Ca は低い傾向があるので、作物による Ca 吸収も交換性 Ca 減少の主要な原因になっているものと考えられる。

窒素の施肥が交換性 Ca, Mg の減少を促進させる機構として、次のような過程が考えられる。施肥されるアンモニア態窒素は硝酸化成を受け、土壌溶液中に硝酸イオンを生成する。この硝酸イオンは陰イオンであるので、土壌溶液中の電気的中性を保つために Ca, Mg を主体とする交換性陽イオンが土壌溶液中に放出される。この現象は第 5 図に示した土壌溶液において、 NO_3-N 濃度と Ca, Mg 濃度のそれぞれに高い相関係数があることに示されている。すなわち、土壌溶液中の硝酸の濃度および量が多いほど交換性 Ca, Mg は多量に土壌溶液に放出されることになる。本試験圃場では、トウモロコシ NPK 区の窒素利用率は 18% 以下であり、未利用の窒素は硝酸化成が緩慢であるとはいえ、収穫期以降においても硝酸イオンに変化し、土壌溶液中におおむね 80% 当量の交換性 Ca, Mg を随伴イオンとして放出させ、雨水とともに下層へ溶脱・流亡して行ったものと考えられる。1998 年時における未利用窒素の随伴陽イオンとして、NPK 区 10 a から

溶脱する Ca, Mg 量は回帰式から求めるとそれぞれ 27.1, 3.0 kg, さらに NK 区では 30.7, 3.3 kg と多量である。このことがエダマメ, トウモロコシ区ともに窒素の利用率が最も低い NK 区で交換性 Ca 含量が最も低くなった理由であると判断される。また, エダマメ区の交換性 Ca, Mg がトウモロコシ区より高い理由は, 窒素利用率が高くてもトウモロコシ区より窒素施肥量が少ないので, 硝酸態窒素の生成総量が少なく, この量に規制され溶脱する交換性 Ca, Mg 量も少なくなったことによる。

V 要 約

1. 20数年間の化学肥料のみによる連作土壌は, 全処理区ともにエダマメ, トウモロコシが正常の生育を示さないほど酸性化し土壌の悪化が進行していた。
2. 土壌の酸性化は交換性 Ca, Mg の減少に起因した。これらの減少は窒素肥料の施肥量が多いほど進行していた。
3. 硝酸化成によって施肥窒素や土壌窒素から陰イオンとして硝酸態窒素が生成する。この硝酸態窒素は, 随伴陽イオンとして交換性 Ca, Mg を土壌溶液中に放出させる。本調査時において, 土壌残留(作物の未吸収)硝酸態窒素は, 随伴イオンとして窒素当量あたり約80%に相当する Ca と Mg の含量を下層へ流亡させていた。栽培作物による Ca, Mg の吸収に加え, 残留硝酸態窒素に伴う溶脱が主要因となり土壌中の Ca, Mg が減少し, 酸性化が進行する機構が存在していた。
4. 酸性化により硝酸化成が抑制され, 土壌溶液中の硝酸態窒素や随伴イオンとしての陽イオン(養分)濃度は低く推移した。そのため栽培作物の生育・生産量は低い水準となった。窒素施用区において, 低い作物体生産量は窒素肥料の利用率を低下させた。そのため, 結果として多量の未利用硝酸態窒素が生じ, これが多量の交換性 Ca, Mg を随伴イオンとして溶脱・流亡させ, 酸性化をさらに促進する機構が認められた。
5. 栽培作物の生育・生産量が低水準であった要因は, 交換性 Ca, Mg の減少に起因する酸性化だけではなく, 土壌中のリン酸やカリ含量が全体的に土壌診断基準値より低い水準であることも影響していたと考えられた。
6. リン酸の土壌への富化は CEC を増大させ, またリン酸吸収係数を低下させることが明らかになった。

謝辞 本研究圃場は農学科の植物生産実習として長年にわたり維持・管理されてきたものであり, 担当されてきた諸先生方, とりわけ, 本報告における生育・収量調査は箱崎美義教授によるものであることを記し, 深い感謝を申し上げます。また, 本研究の機会を与えられた「総合研究」

化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響

責任者，江崎要教授に御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 竹迫 紘：フローインジェクション分析法による土壌抽出液のアンモニア態窒素の定量法，土肥誌，**62**, 128-134, (1991)
- 2) 土壌養分分析法：農林省農林水産技術会議事務局監修，土壌養分測定法委員会編，養賢堂，(1987)
- 3) 中林和重・箱崎美義 他：肥料三重素を連続施用したほ場におけるダイズおよびトウモロコシの無機成分の吸収，明大農研報，**119**, 33-42, (1999)
- 4) 植物栄養土壌肥料大辞典編集委員会編：植物栄養土壌肥料大辞典，養賢堂，(1987)
- 5) 竹迫 紘 他：土壌溶液による土壌用分診断法の検討—硝酸態窒素濃度とコマツナの生育との関係—，明大農研報，**88**, 1-12, (1991)
- 6) Okajima, H and H. Imai: Role of anion in controlling mineral ion concentration of the soil solution, **JARQ**, **9**, 191-197, (1975)
- 7) Barber S.: Soil nutrient bioavailability, Wiley inc. pub., (1984)
- 8) 野菜栽培土壌診断基準作成小委員会編：野菜栽培土壌の診断基準のとりまとめ，関東東海土壌肥料技術連絡協議会，(1975)
- 9) 岡島秀夫：酸性土壌と養分の保持能，酸性土壌とその農業利用，博友社 169-193, (1984)
- 10) Schalscha, E. B., Pratt, P. F. and Soto, D: Effect of phosphate adsorption on the cation-exchange capacity of volcanic ash soils, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **38**, 539-540, (1974)
- 11) 竹迫 紘：リン酸の施用による CEC の変動，土壌養分の適正水準と上限値に関する研究，**41-49**，関東土壌養分基準検討会，(1987)
- 12) 細谷 毅・山口幹周：畑土壌の適用塩基組成についてのまとめ，土壌養分の適正水準と上限値に関する研究，**167-174**，関東土壌養分基準検討会，(1987)
- 13) 農林省農林水産技術会議：畑土壌の生産力に関する研究，農林省，(1962)
- 14) 亀和田国彦：可給態リン酸の適正水準と上限値，土壌養分の適正水準と上限値に関する研究，**5-30**，関東土壌養分基準検討会，(1987)

論 文

トウモロコシのリン酸欠乏条件における
特異的発現遺伝子に関する研究

内藤 忠雄・箱崎 美義・堀井 陽子・堤 伸浩*

2001年8月3日受理

Study on the Specific Gene Expressed in *Zea mays* L.
under Phosphate Starvation

Tadao NAITO, Miyoshi HAKOZAKI, Yoko HORII and Nobuhiro TSUTSUMI

Summary

Corn seedlings at 27 days were grown under phosphate starvation in experimental fields for long term of 25 years, and the gene expression was compared to the seedlings grown with phosphate application for the same term. Total RNA was extracted from these seedlings to isolate mRNA, and the purified mRNA was subjected to RT-PCR using arbitrary primers. The amplified cDNAs were electrophoresised on agarose gel, and genes specifically expressed in the phosphate-deficient seedlings were identified by the simplified differential display method. The phosphate starvation specific DNA bands were found and cloned. One of these clones was confirmed to be starvation specific by northern blotting. The sequence of this confirmed DNA fragment was analyzed by the cycle sequencing method. The result of the sequence homology analysis indicated that this clone has an unknown sequence.

緒 言

1998年ペンシルヴァニア州で開催された“植物学におけるリンに関するシンポジウム”で、農業用無機リン酸肥料の主要な資源としてのリン鉱が今後50年から75年以内に枯渇するということを知らされ参加者達の注目を集めた¹⁾。リン酸は作物にとって、必須養分として不可欠であるため、リン酸欠乏耐性作物の創成が重要な課題となろう。植物は種々の環境変動に応答して、体内で代謝変化を起こすことはよく知られた事実であるが、無機リン酸欠乏ストレス下においても特有の反応が起こることが知られている。例えば無機リン酸欠乏が起こると、トマトでは酸性フォスファターゼ (APase) 活性が高まり²⁾、トマト、タバコではリボヌクレアーゼ (RNase) 活性が高まる^{3,4)}。また、無機リン酸輸送体の発現も知られている⁵⁾。これらの物質は細胞培養下で、細胞内で合成されたり細胞外へ分泌することも知られている。

* 東京大学大学院農学生命科学研究科

一方、解糖系でのリン酸節約機構も知られており、ATP の消費を抑え中間産物の脱リン酸化を促進する経路が誘導される例もある⁶⁾。トマトでは、regulon として知られる同一のシグナルによって調節される一連の遺伝子群が知られている⁷⁾。大腸菌では培地からの無機リン酸除去に反応する *pho* regulon が知られ⁸⁾、この regulon は少なくとも 31 個の遺伝子が 8 個の別々のオペロンとして存在している^{8,9)}。

明治大学農学部には 20 数年間継続して同一の施肥条件で使用された実験圃場があり、上記のような結果が実際の圃場でも得られるかどうかをトウモロコシを用いて検討した。

トウモロコシではリン酸欠乏条件下で発現誘導される遺伝子はまだ同定されていない。本研究ではリン酸欠乏下で特異的に発現する未知の DNA 断片が確認されたのでここに報告する。

材料および方法

◎実験材料

実験には 25 年間同じ施肥条件で使用されている明治大学の实验圃場で生育させたトウモロコシを用いた。生育実験は 1997 年から 1999 年までの 3 年間行われた。施肥条件は竹迫らの方法に従った¹⁰⁾。トウモロコシはスイートコーンのハニーバンダム (日東農産種苗) を用い、窒素 (N)、リン酸 (P)、カリウム (K) を与えた土壌で生育させたものを対照区とし、リン酸のみを欠乏させた土壌で生育させたものをリン酸欠乏区の試料とした。トウモロコシはそれぞれ 5 月上旬に播種し、播種後 27 日目に採取した。実験試料は採取後すぐに液体窒素中で凍結し、-80 度で保存した。

◎生葉重調査

1998 年から 1999 年までの 2 年間にわたり対照区、リン酸欠乏区とともに 120 個体を用いて調査した。試料は周辺効果を考慮して、試験区の中央の畝から採取したものをを用いた。

◎実験手順

・全 RNA の単離

全 RNA はトウモロコシの葉を取り除いた茎頂部から、以前に内藤らによって示された SDS-フェノール法の変法を用いて単離された¹¹⁾。試料 1 g に対し 5 ml の homogenate buffer (2 % SDS, 50 mM Tris-HCl pH 7.5, 10 mM MgCl₂) を加え、等量のフェノール・クロロホルム・イソアミルアルコール (25 : 24 : 1) で抽出を行った (PCI 抽出)。得られた全 RNA はその後の操作に用いた。

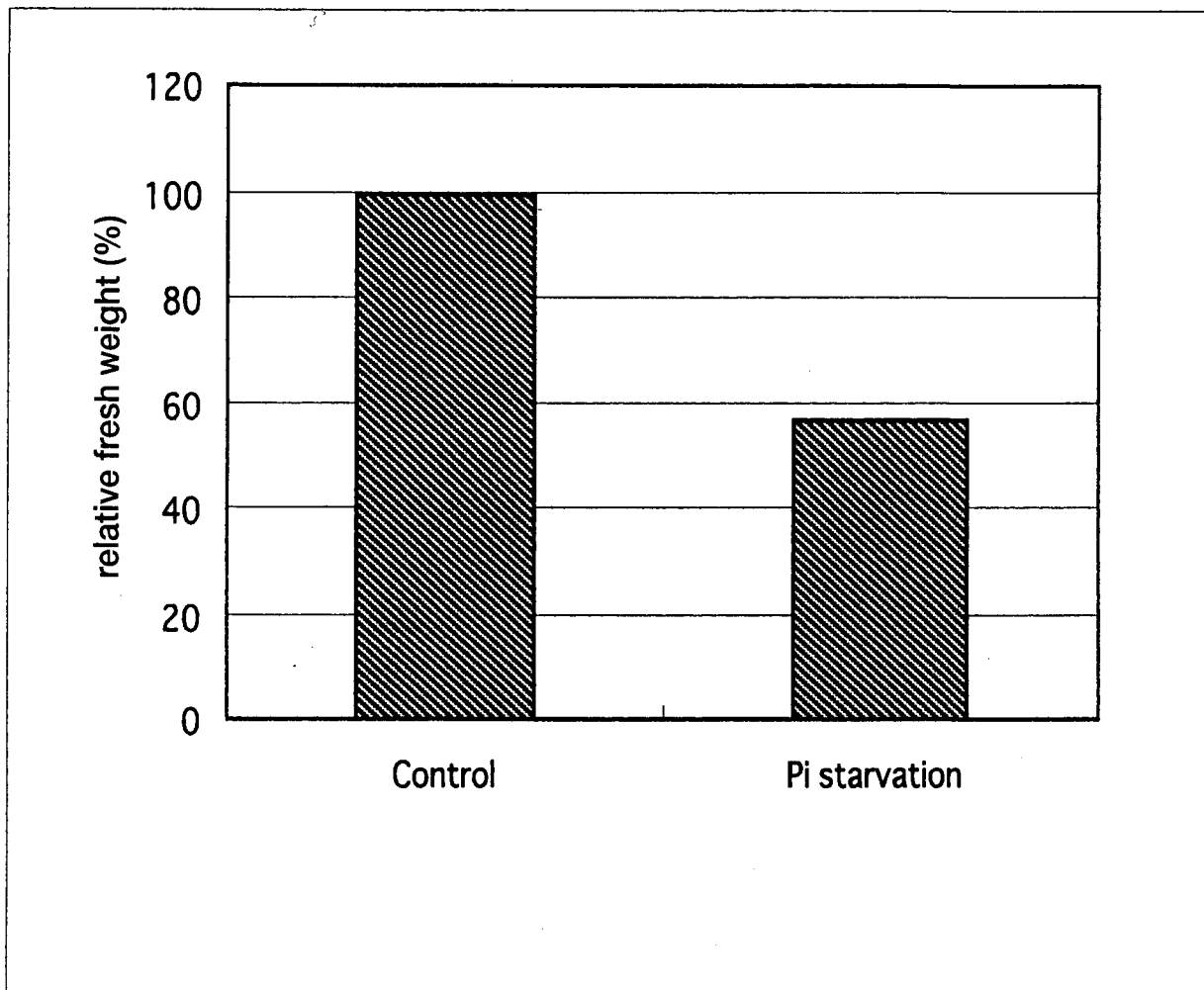


Fig.1 Leaf fresh weights of harvest time in the corn grown under the Pi starvation.

- DNA の除去

ディファレンシャルディスプレイ法の問題点となる DNA の混入を防止するために、得られた全 RNA に DNase I 処理を行った。処理後 PCI 抽出を行い、混入したタンパクと DNA を除去した。

- mRNA の精製

mRNA の精製には OligotexTM-dT 30 <super> mRNA purification kit (TaKaRa) を用いた。得られた mRNA は first strand cDNA の合成に用いた。

- cDNA の合成

cDNA の合成は RT-PCR kit (STRATAGENE) のプロトコールに従って行った。100 ng の mRNA から cDNA を合成し、SUPRECTM-02 (TaKaRa) スピнкаラムチューブを用いて余分な primer と dNTP を除去した。

・簡易 Differential Display

Differential Display は以前に Nakazono らによって示された簡易 Differential Display 法を用いて行った¹²⁾。PCR 反応には GeneAmp PCR System 9700 (PERKIN ELMER Applied Biosystems) を使用した。プライマーは、アミノ酸配列を考慮して設計された 10 mer の任意プライマー (GENHUNTER および OPERON TECHNOLOGIES) を 40 種類用いた。鋳型 cDNA に任意プライマー 2 μ M, dNTPs 0.2 μ M, Taq DNA polymerase (TaKaRa Ex TaqTM) 1.5 U を加え、最終液量 25 μ l として PCR 反応を行った。PCR の反応条件は、初めに 92°C で 5 分間変性させた後、92°C 1 分、35°C 1 分、72°C 2 分を 40 サイクル行い、最後に 72°C で 5 分間の伸長反応を行った。

増幅させた PCR 産物を 1.5% アガロースゲルで電気泳動し、それぞれの発現を比較した。マーカーには λ DNA/*Hind* III digest サイズマーカーを使用し、染色にはエチジウムブロマイドを用いた。

・クローニング

簡易 Differential Display 法によりリン酸欠乏区の特異的に発現した PCR 産物をゲルから回収し、TA cloning kit (Invitrogen) を用いてクローニングした。

・ノーザンハイブリダイゼーション

ノーザン解析には DIG DNA Labeling kit 及び DIG Luminescent Detection kit (Boehringer Mannheim) を用い、Boehringer Mannheim のマニュアルに従って行った。

1 ウェルにつき 2 μ g の mRNA をホルムアルデヒド変性ゲル (1.0% アガロース, 1 \times MOPS, 18% ホルムアルデヒド) で電気泳動し分離した。ホルムアルデヒドを除去するため、20 \times SSC (3 M NaCl, 0.3 M クエン酸ナトリウム) でゲルを洗った後、20 \times SSC を用いてナイロンメンブレン (Boehringer Mannheim) に転写した。プローブはリン酸欠乏特異的クローンを鋳型として、PCR により DIG-dUTP を取り込ませて作成した。プレハイブリダイゼーション、ハイブリダイゼーションはハイブリダイゼーション液 [50% ホルムアミド, 5 \times SSC, 0.1% N-lauroyl-sarcosine (w/v), 0.02% SDS (w/v), 2% Blocking reagent (w/v)] を用い、50°C で行った。

検出はジゴキシゲニン抗体アルカリフォスファターゼをプローブに結合させた後、アルカリ条件下で発光基質である CSPD を加え、X 線フィルムに感光させて行った。

・シーケンス解析

リン酸欠乏区トウモロコシの mRNA に特異的にハイブリダイズする事が確認されたリン酸欠乏特異的 cDNA クローンのシーケンス解析を行った。cDNA クローンよりそのプラスミド

DNA を単離し、シーケンス反応を行った。反応は BigDye™ Terminator Cycle Sequencing Ready Reaction Kit (Perkin-Elmer) を用いて行い、ABI PRISM™ 310 で解析した。

決定された塩基配列に対して、遺伝子解析ソフトを用いてアミノ酸配列に翻訳し、BLAST を用いてデータベースに登録されている配列との相同性検索を行った。

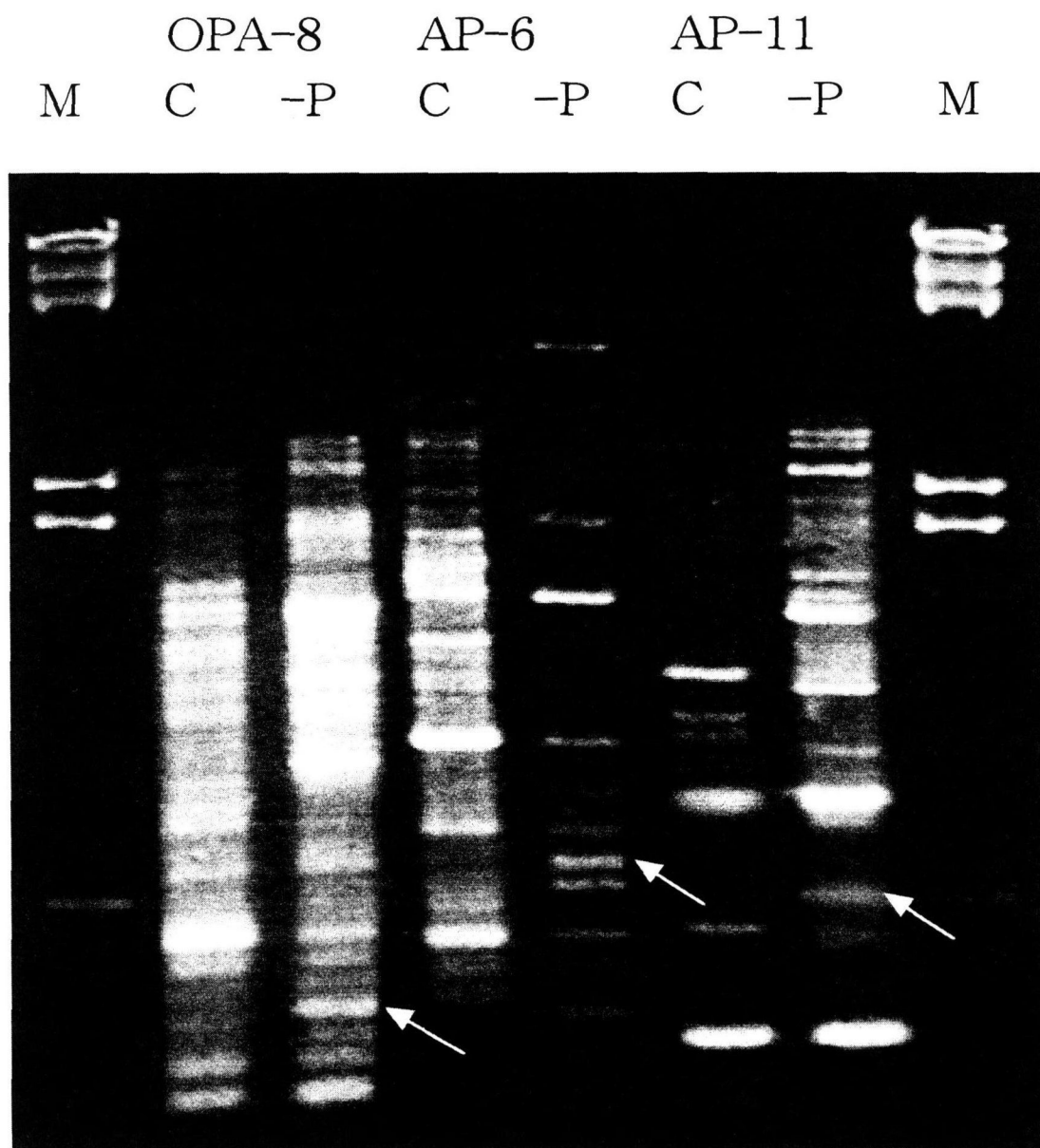


Fig.2 Electrophoretic patterns of differentially amplified PCR fragment. Arrows indicate the starvation specific bands.
M : Lambda/*Hind* III marker, C : control (rich P_i), -P : P_i-deficient, OPA-8, AP-6, AP-11 : primers.

C -P

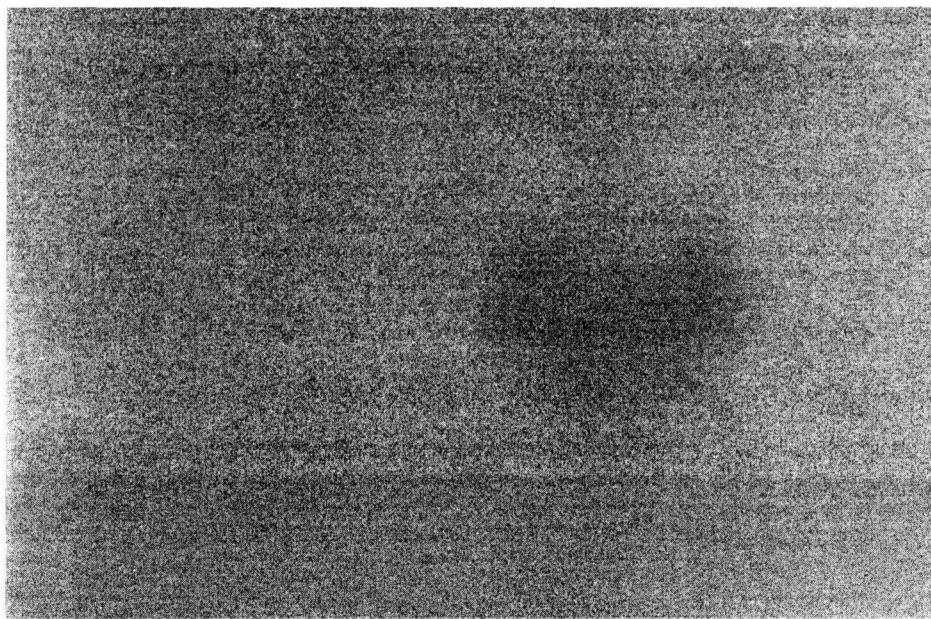


Fig.3 Northern blot analysis of mRNA from maize using the phosphate starvation specific DIG-labelled cDNA fragment as a probe.
C : control (rich P_i), -P : P_i -deficient.

結果および考察

明治大学農学部の実験圃場は、25 年間継続して同一の施肥条件で使用されており、この圃場で生育させたトウモロコシは栄養素欠乏条件を必要とする本研究に最適な試料である。実験圃場における対照区とリン酸欠乏区のリン酸含量は、以前に竹迫らによって報告された通りである¹⁰⁾。Fig.1 は 1998 年から 1999 年の 2 年間の収穫時生葉重平均値について、対照区を 100 とした場合のリン酸欠乏区の値を示す。比較するとリン酸欠乏区の生葉重が激減していることは歴然と判別できる。しかし、リン酸欠乏区で全ての個体が枯死することはない。すなわち、何らかの適応戦略がトウモロコシにあると考えられた。当然ながら、リン酸欠乏条件下での新しい遺伝子発現誘導が示唆された。

著者らは簡易 Differential Display 法を用いて、リン酸欠乏の土壤中で生育させたトウモロコシからリン酸欠乏特異的 DNA 断片を単離した。Fig.2 は対照区とリン酸欠乏区との遺伝子発現の差異を示したものである。実際には 8 個のリン酸欠乏特異的バンドが得られたが、Fig.2 ではそのうちの 3 個の特異的なバンドを示している。

Fig.3 は Fig.2 で得られたリン酸欠乏特異的 DNA 断片をクローニングし、プローブとしてノーザンハイブリダイゼーションを行った結果である。簡易 Differential Display 法によって単

| | | | | | |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|
| 9 | 18 | 27 | 36 | 45 | 54 |
| 5' ACA GTA AAT TCT ATC AAC GAG CTC AAA GAA TTG CTG CAT GTC CTA CTG GAG AAA | | | | | |
| Thr Val Asn Ser Ile Asn Glu Leu Lys Glu Leu Leu His Val Leu Leu Glu Lys | | | | | |
| 63 | 72 | 81 | 90 | 99 | 108 |
| GAA AAA GTA AGA AAG GAT AAT GGA GGA TCG TCT TCA AAA TCT CTG CCT TAC AAC | | | | | |
| Glu Lys Val Arg Lys Asp Asn Gly Gly Ser Ser Ser Lys Ser Leu Pro Tyr Asn | | | | | |
| 117 | 126 | 135 | 144 | 153 | 162 |
| TCT AAG ACT GAT AAA GAA AAA GAT AGG GAG GAA AAA AGC CAT GGA AGT GAA GAA | | | | | |
| Ser Lys Thr Asp Lys Glu Lys Asp Arg Glu Glu Lys Ser His Gly Ser Glu Glu | | | | | |
| 171 | 180 | 189 | 198 | 207 | 216 |
| GAT AAT CAT GAG CAG CAC TAC GAA GAC GAA GAA AAG ACT CGA AGC AAG GAG GAA | | | | | |
| Asp Asn His Glu Gln His Tyr Glu Asp Glu Glu Lys Thr Arg Ser Lys Glu Glu | | | | | |
| 225 | 234 | 243 | 252 | 261 | 270 |
| AAT ATG AAC ACC CTC TGG ATG GAG AGC TTT TGG AAT CAA CTG AAT GCT CTA ATA | | | | | |
| Asn Met Asn Thr Leu Trp Met Glu Ser Phe Trp Asn Gln Leu Asn Ala Leu Ile | | | | | |
| 279 | 288 | 297 | 306 | 315 | 324 |
| CAC AAG AAT GAA TTG CAA AAG CTA GGG GTC ATC ATA CCA TAT CCT GTG GAA TGG | | | | | |
| His Lys Asn Glu Leu Gln Lys Leu Gly Val Ile Ile Pro Tyr Pro Val Glu Trp | | | | | |
| 333 | 342 | 351 | 360 | 369 | 378 |
| GAA AGC TTA CCA TTC CCG GAA AGC TAC AAG CCA TTG AAC CTT AGG TCT TTC GAT | | | | | |
| Glu Ser Leu Pro Phe Pro Glu Ser Tyr Lys Pro Leu Asn Leu Arg Ser Phe Asp | | | | | |
| 387 | | | | | |
| GGA ATA GGA TCG CAA 3' | | | | | |
| Gly Ile Gly Ser Gln | | | | | |

Fig. 4 Nucleotide and the deduced amino acid sequences of the phosphate starvation specific cDNA fragment.

離した 8 個のリン酸欠乏特異的 DNA 断片のうち、1 個のみがそのリン酸欠乏特異的発現が確認された。

Fig. 4 はノーザン解析によってリン酸欠乏特異的発現が確認された DNA 断片の塩基配列と推定されるアミノ酸を示したものである。データバンクとの相同性検索の結果、本実験で得られた DNA 断片は既知の遺伝子との有意な相同性は示さなかった。

穀物の種子や幼植物にはフィチンが存在し、リン酸の重要な貯蔵物質であることが知られてい

る。トウモロコシでは酸性フォスファターゼであるフィターゼが見い出されているが¹²⁾、これは構成的発現をしているようでありリン酸欠乏条件下で誘導される何らかの耐性機構が存在するのかも知れない。

謝 辞

本実験を遂行するにあたり、染野繁明氏、北野慶一郎氏には大変な技術的助力をいただいた。ここに感謝する次第である。

引 用 文 献

- 1) William C, Plaxton, M.Christian Carswell(1999). Metabolic Aspects of the Phosphate Starvation Response in Plants, In "PLANT RESPONSES TO ENVIRONMENTAL STRESSES" ed.by H.R. Lerner, 349-372 Marcel DEKKER, INC.N.Y.
- 2) Goldstein AH, Baertlein DA, McDaniel RG(1988). Phosphate starvation inducible metabolism in *Lycopersicon esculentum* I. Excretion of acid phosphatase by tomato plants and suspension cultured cells. Plant physiol 87 : 711-715
- 3) Dodds PN, Clarke AE, Newbigin E (1996). Molecular characterization of an S-like RNase of *Nicotiana glauca* that is induced by phosphate starvation. Plant Mol Biol 31 : 227-238
- 4) Löffler A, Abel S, Jost W, Beintema JJ, Glund K (1992). Phosphate-regulated induction of intracellular ribonucleases in cultured tomato (*Lycopersicon esculentum*) cells. Plant Physiol 98 : 1472-1478
- 5) Muchhal US, Pardo JM, Raghothama KG (1996). Phosphate transporters from the higher plant *Arabidopsis thaliana*. Proc Natl Acad Sci USA 93(19) : 10519-23
- 6) Theodorou ME, Plaxton, WC (1993). Metabolic adaptations of plant respiration to nutritional phosphate deprivation. Plant Physiol 101 : 339-344
- 7) Sadka A, DeWald DB, May GB, Park WD, Mullet JE(1994). Phosphate modulates transcription of soybean VspB and other sugar-inducible genes. Plant Cell 6 : 737-749
- 8) Rao NN, Torriani A(1990). Molecular aspects of phosphate transport in *Escherichia coli*. Mol Microbiol 4 : 1083-1090
- 9) Wanner BL(1993). Gene regulation by phosphate in enteric bacteria. J Cell Biochem 51 : 47-54
- 10) 竹迫紘, 三宅亜弥, 堀水保 (2001) 化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響 明治大学農学部研究報告 第 126 号 19-39
- 11) 内藤忠雄, 山口彦之 (1970) 大豆発芽期における胚軸 RNA の電気泳動パターンの品種間差異 日本育種学会雑誌 20 巻 別冊 2, 145
- 12) Nakazono, M., Yoshida, K.(1997). A rapid and efficient method for the isolation of differentially expressed genes : simplified differential display. Plant Biotechnology 14(3) : 187-190
- 13) Hubel F, Beck E(1996). Maize root phytase. Plant physiol 112 : 1429-1436

〔研究ノート〕

肥料三要素を連続施用したほ場におけるダイズおよび トウモロコシの無機成分の吸収

中林 和重・箱崎 美義・村越久美子・河野 敬人

(1999年 4 月 8 日受理)

Absorption of inorganic nutrients by green soybean and corn in the field under continuous application of three major nutrients

Kazushige NAKABAYASHI, Hakozaki MIYOSHI, Kumiko MURAKOSHI

and Takato KOUNO

Summary

The absorption of NPK elements by green soybean and corn plants were examined under conditions of 23 years consecutive application of these elements.

In green soybean, the absorption of nitrogen (N) and the yield were increased by the application of phosphate (P). In contrast, corn responded weakly to Phosphate fertilizer, and its yield was low in all experimental plots, probably because of the lowering of soil fertility due to the long-term application of chemical fertilizers.

緒 言

本農学部付属ほ場には、三要素 (N, P, K) の化学肥料の施用だけで、23年間もの間、ダイズとトウモロコシをそれぞれ作付し続けた畑地がある。本研究では、これらの作物の生育と三要素 (N, P, K) の養分吸収について調査したので、その結果を報告する。

材料および方法

ダイズについて

栽培概要

前記の畑地において1997年 4 月28日にエダマメ用品種 ‘白鳥枝豆’ を播種し、一般慣例によ

り栽培管理し、1997年7月14日に収穫した。使用した肥料は硫酸アンモニウム (N : 49.5 g/区)、過リン酸石灰 (P_2O_5 : 66.0 g/区)、塩化カリウム (K_2O : 99.0 g/区) で、すべて元肥として与えた。

試験区

試験区は肥料の三要素、すなわち、N, P, K の施用の組み合わせにより O 区 (無施肥区), N 区 (窒素施用区), P 区 (リン施用区), K 区 (カリウム施用区), NP 区 (窒素, リン施用区), NK 区 (窒素, カリウム施用区), PK 区 (リン, カリウム施用区) および NPK 区 (窒素, リン, カリウム施用区) の 8 試験区についての三反復 (計24試験区) である。1 区画の広さは 8.25 m² で連続した 3 うね (畝間 55 cm) である。

収量調査、化学分析およびデータ処理

収量調査は各区75株を用いて行い、化学分析用試料は各々の区で平均的な生育をした個体を 3 株選んだ。収穫後、ただちに茎葉、子実部 (莢を含む) に分けて通風乾燥し、微粉碎して湿式灰化 (硫酸分解法³⁾) した。これに含まれる全窒素を水蒸気蒸留法で、リンをバナドモリブデン酸比色法⁴⁾で、カリウムを原子吸光光度法によって定量し、作物体の三要素含有率を求めた。なお、これらの測定値を統計処理 (分散分析) し、信頼度80%を越える項目について考察した。

トウモロコシについて

栽培概要

前記の畑地において1998年4月28日に生食用品種 ‘スクランブル88’ を播種し、一般慣例によって栽培管理して、7月14日に収穫した。施肥はすべて元肥とし、硫酸アンモニウム (N : 304 g/区)、過リン酸石灰 (P_2O_5 : 281 g/区) および塩化カリウム (K_2O : 214 g/区) を用いた。

試験区

肥料の三要素、すなわち N, P, K の施肥の組み合わせにより、K 区 (カリウム施肥区), NK (窒素, カリウム施肥区), PK (リン, カリウム施肥区) および NPK 区 (窒素, リン, カリウム施肥区) の 4 試験区を設け 6 反復した (計24試験区)。1 区画の広さは 11.25 m²/区で 3 うね (畝間 75 cm) である。

収量調査、化学分析およびデータ処理

収量調査は各区57株を用いて行い、化学分析用試料には各々の区で平均的な生育をした個体を 3 株選んだ。収穫後、ただちに稈・葉部と子実部に分けて通風乾燥し、微粉碎してケルダール分解 (硫酸分解法³⁾) した。これに含まれる全窒素を水蒸気蒸留法によって、リンをバナドモリブデン酸比色法⁴⁾によって、カリウムを原子吸光光度法によって定量し、作物体の三要素含有率を求めた。なお、これらの測定値を統計処理 (分散分析) し、信頼度が80%を越える項目について考察した。

肥料三要素を連続施用したほ場におけるダイズおよびトウモロコシの無機成分の吸収

結果および考察

ダイズについて

乾燥重量

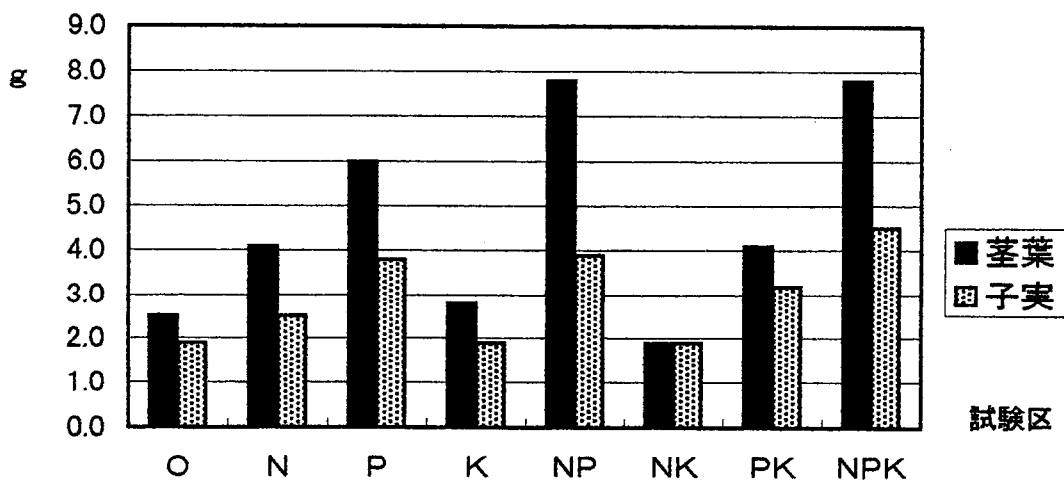
1株当たりの全乾燥重量は3.8 g から 12.3 g と試験区ごとに大きな差がみられ、NP 区 (11.7 g) と NPK 区 (12.3 g) で大きかった。また、子実部でも試験区によって差が見られ、NPK 区 (4.5 g)、NP 区 (3.9 g) および P 区 (3.8 g) の順に大きな値を示した。このことから、リンの施肥が子実の生産のために重要であったと考えられる (第1図)。

しかし、最も大きい値を示した NPK 区の子実の乾燥重量 (4.5 g/1 株) でも、一般的なダイズ¹⁾の収量⁵⁾の半分以下であった。これは、実験に用いた品種が早生種であったため、リンの施肥区ではいくらか着生したものの、全般的に根粒菌の着生が少なく、窒素固定が十分に行われなかったこと⁶⁾や、同一畑地で20年以上もの間、同一作物を栽培し続けてきたため、地力が低下したためだと考えられる。今後、土壌の物理化学性や根粒菌の着生状態などについてさらなる調査が必要と思われる。

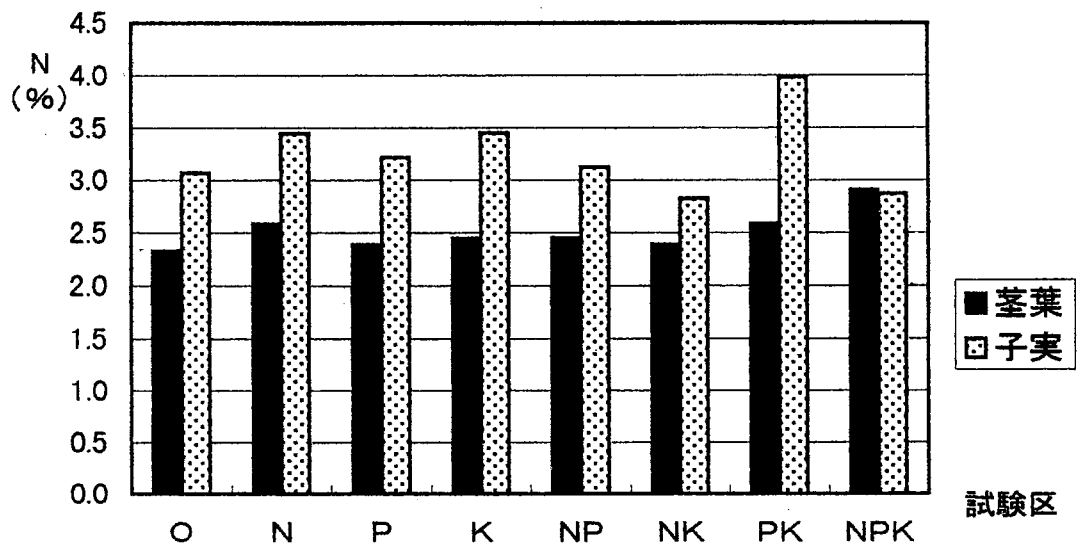
三要素含有率

茎葉の窒素含有率は、リンの施肥の有無により左右され、無施用では平均2.44%であるのに対し、施用すると平均2.60%に増加した。また、窒素の施肥の有無によっても影響され、無施用では平均2.46%であるのに対し、施用すると平均2.58%に増大する傾向があった。

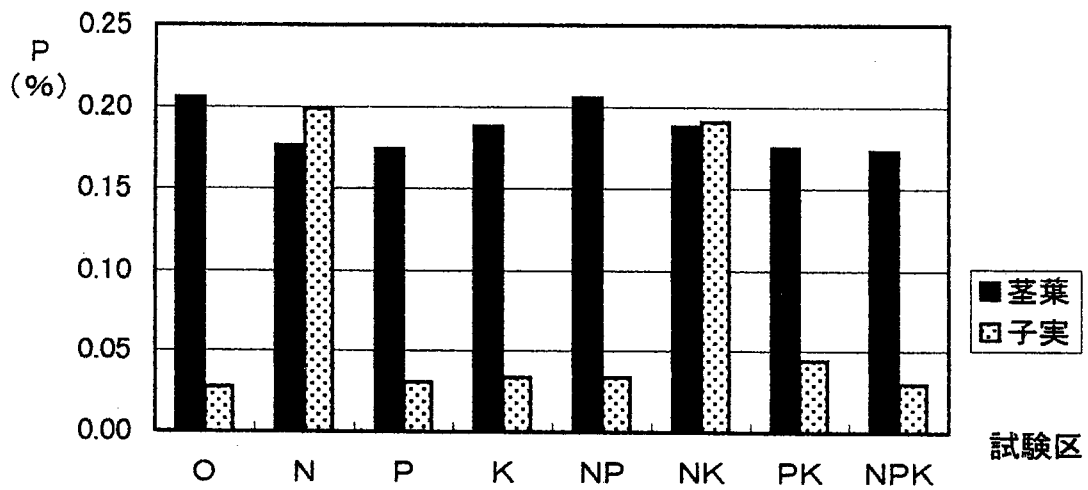
子実の窒素含有率は平均3.25%であった。また、リンと同時にカリウムの施用がなされると、とくに窒素含有率が増加する (PK 区で3.98%) という相互効果がみられた (第2図)。



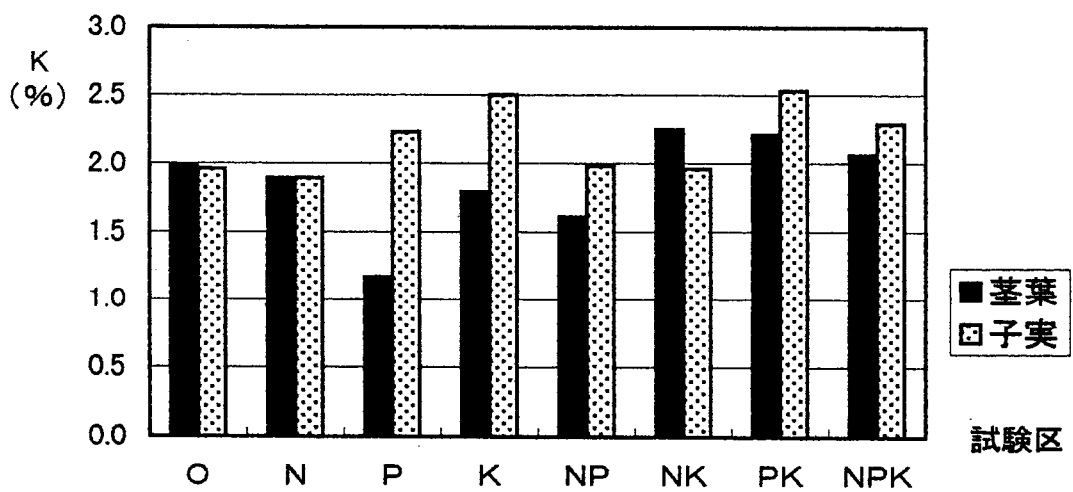
第1図 枝豆の乾燥重量 (g/1 株)



第2図 枝豆のN含有率 (%)



第3図 枝豆のP含有率 (%)



第4図 枝豆のK含有率 (%)

肥料三要素を連続施用したほ場におけるダイズおよびトウモロコシの無機成分の吸収

リン含有率は施肥法による差はみられず、茎葉で平均0.19%，子実で0.07%と低い値であった（第3図）。その理由の1つとして、本畑地が火山灰地であるため土壌によるリンの固定が行われ、どの区もエダマメに十分に吸収されなかったものと考えられる。今後、土壌の可給態リン酸などについてさらに詳しく調べていく必要がある。

カリウム含有率は、茎葉ではカリウムの施肥の有無により左右され、無施用では平均1.67%であるのに対し、施用すると平均2.15%に増加した。一方、子実では窒素の施肥の有無により左右され、無施用では平均2.32%であるのに対し、窒素と同時に施用すると平均1.84%に低下するという相乗効果が認められた（第4図）。

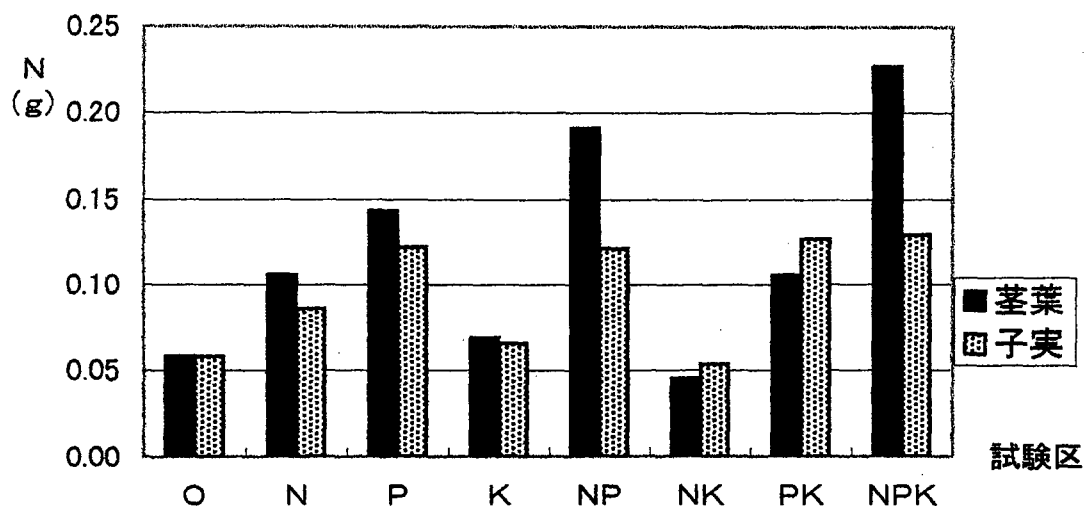
三要素の吸収量と肥料の利用効率

作物体の乾燥重量と三要素含有率をもとに、1株当たりの窒素、リン、カリウム吸収量（第5, 6, 7 図）および肥料の利用効率（第1表）を求めた。

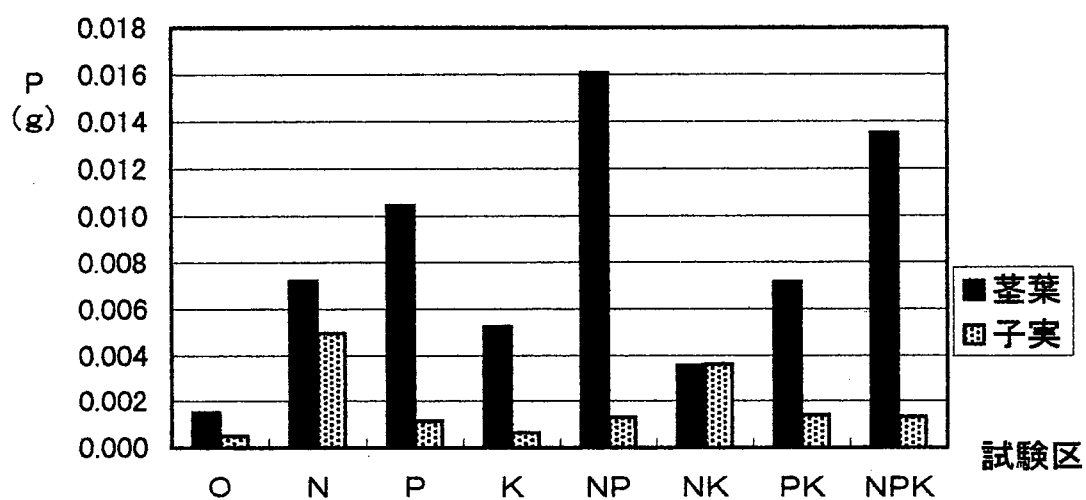
ダイズの窒素吸収量は、リンの施肥により左右され、リンを施用した試験区で増加した。とく

表—1 エダマメの肥料利用率（%）

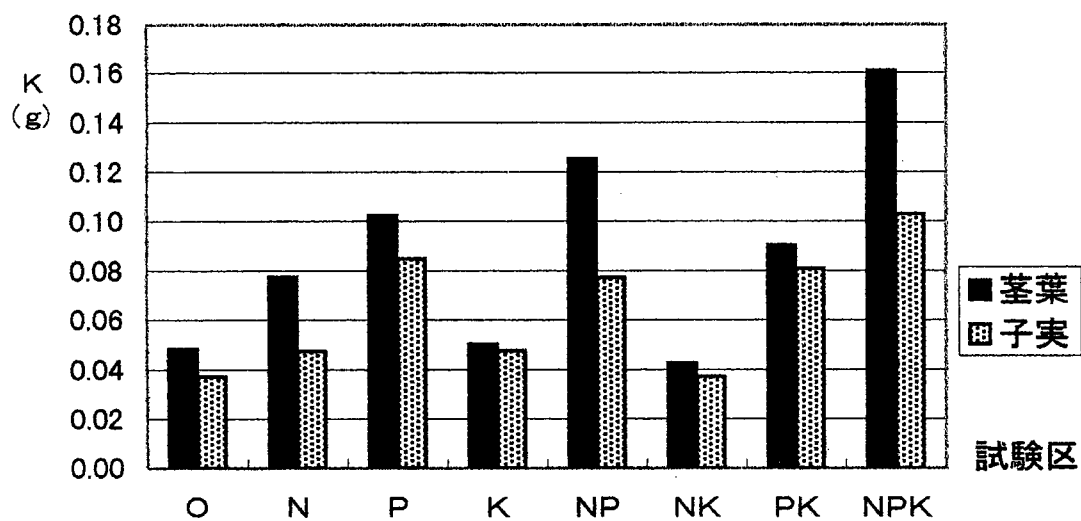
| 試験区 | 窒素利用率 | リン利用率 | カリウム利用率 |
|-----|-------|-------|---------|
| N | 29.2 | — | — |
| P | — | 0.6 | — |
| K | — | — | 6.1 |
| NP | 47.4 | 0.9 | — |
| NK | 15.0 | — | 5.0 |
| PK | — | 0.4 | 10.8 |
| NPK | 54.0 | 0.7 | 16.6 |
| 平均値 | 36.4 | 0.6 | 9.6 |



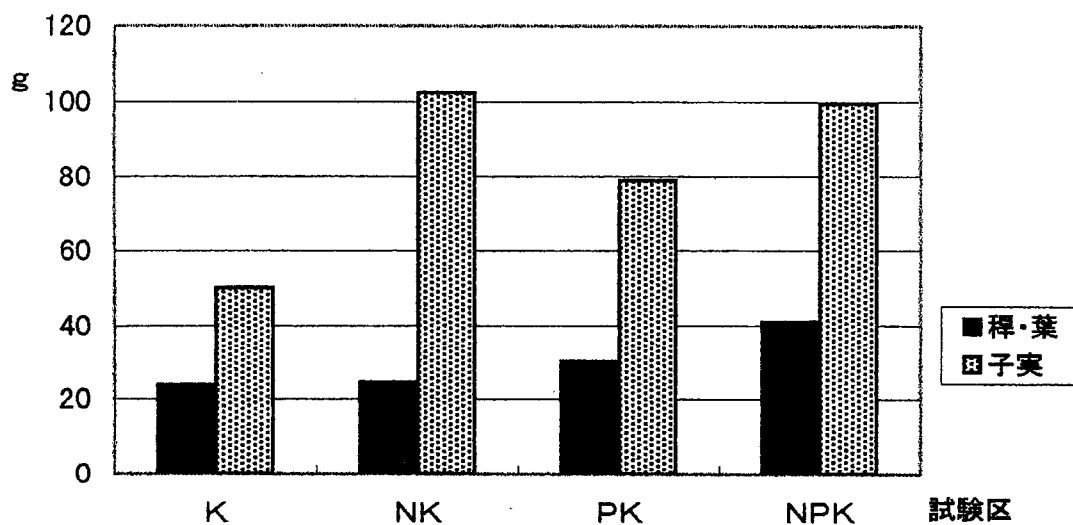
第5図 枝豆のN吸収量 (g/1株)



第6図 枝豆のP吸収量 (g/1株)



第7図 枝豆のK吸収量 (g/1株)



第8図 トウモロコシの乾燥重量 (g/1株)

肥料三要素を連続施用したほ場におけるダイズおよびトウモロコシの無機成分の吸収

に、子実の P, NP, PK, NPK 区では平均値の約1.3倍と顕著であった。これは、リンが窒素の吸収を助長すること⁷⁾や、根粒菌着生増進効果がある⁸⁾ためだと考えられ、リンの施肥によりエダマメの乾燥重量だけでなく、N 含有率が増加したためと考えられる。このため、N と P を同時に施用した区での肥料利用率は NK 区 (15.0%), N 区 (29.2%) よりも高く 5 割程度であった。

リン吸収量は、リンの施肥により左右され、リンを施用すると増加するといえる。作物体のリン含有率には施肥法による差はなかったが、リン施肥区で子実重が大きかったため、吸収量が多いという結果になった。しかし、リン酸肥料の利用率は 1%程度と、どの区も低い値を示した。

また、カリウム吸収量は、窒素を施用すると減少するといえる。このことは、窒素がカリウムの吸収を悪化させる要素であるため⁷⁾であると考えられる。また、K 区や NK 区で少なかったのは収量（乾燥重）が低かったためである。肥料の利用率は各区とも 1～2 割であった。

トウモロコシについて

乾燥重量

全試験区のうちで稈・葉部、子実部の形質が成長したのは NPK 区および NK 区であった。また、子実部に着目すると、窒素を施肥した NK 区および NPK 区の収量が多く、PK 区および K 区では比較的になかった（第 8 図）。これは子実の成長には窒素が必要のため⁷⁾と考えられる。しかしながら、本試験で得られた子実部はどの試験区も食用に供する大きさに達していなかった。施肥水準が高いのにもかかわらずこのような結果になったのは 20 年余にわたり有機質資材を用いることなく化成肥料を連用したため地力が低下したものと考えられる。肉眼調査によれば、トウモロコシは深根性の作物であるのに根圏が 20～30 cm であるものも見られたことから、土壌の性質の調査が望まれる。

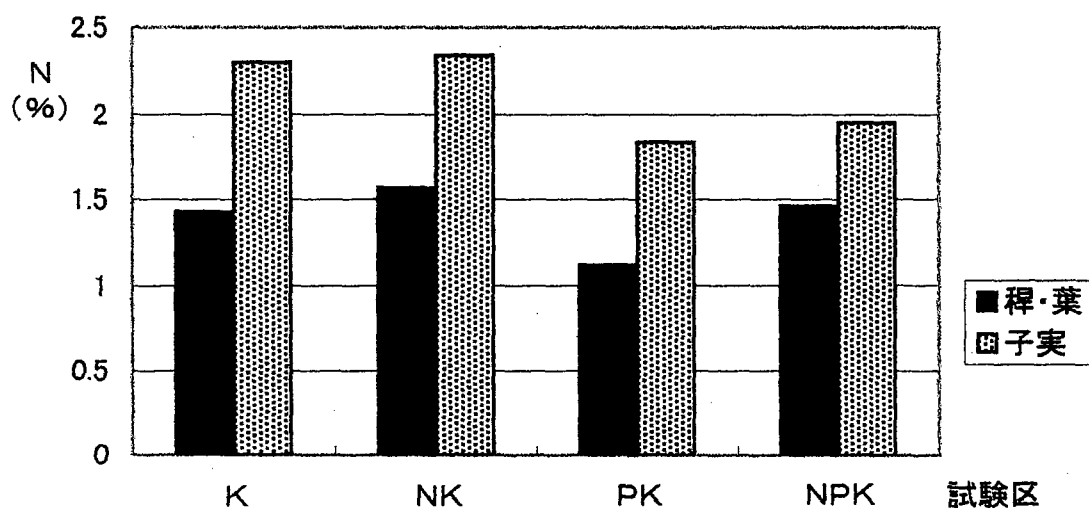
三要素含有率

窒素含有率は NK 区が最も高く、稈・葉部で 1.57%, 子実部で 2.34% であった。次いで稈・葉部では NPK 区 (1.43%), 子実部では K 区 (2.30%) が高い値を示した（第 9 図）。リン含有率は稈・葉部ではリン施肥区が平均 0.02% と他の区に比べて大きい値を示したが、子実部では逆にリン施肥区で平均 0.05% と最も低い値となった（第 10 図）。

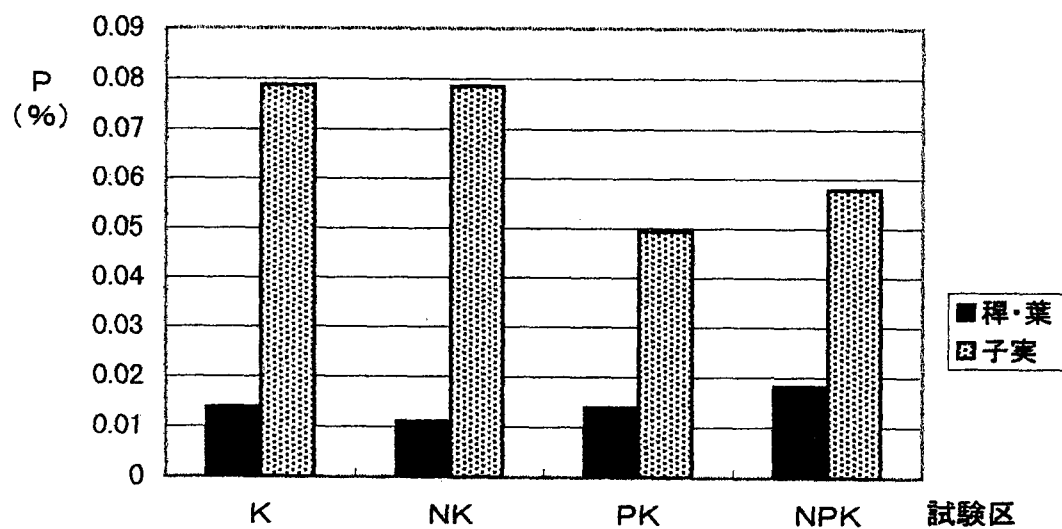
三要素の吸収量と肥料利用率

作物体の乾燥重量と無機成分含有率を基に作物体 1 株当たりの窒素、リン、カリウムの吸収量（第 12, 13, 14 図）とその肥料の利用率（第 2 表）を算出した。

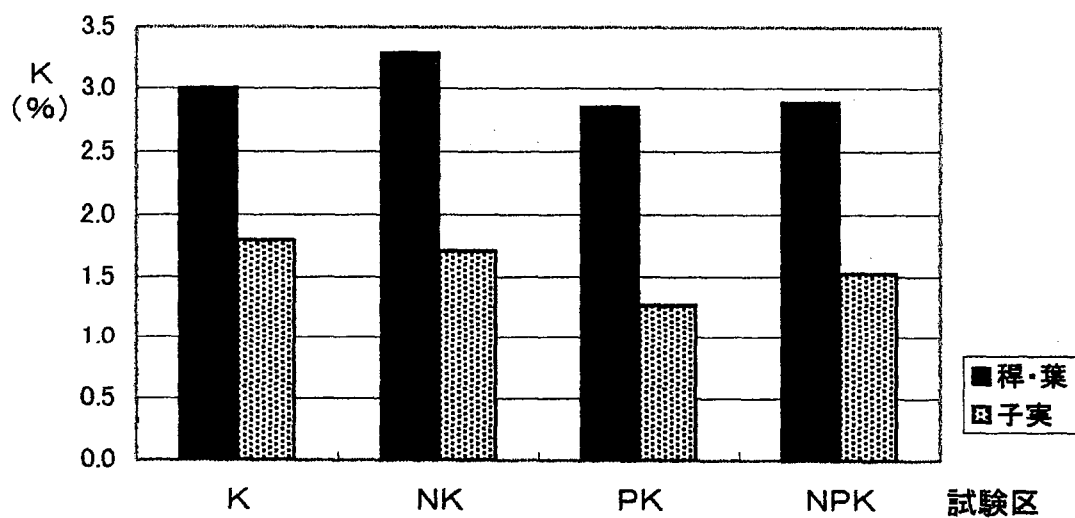
トウモロコシ²⁾の窒素吸収量は稈・葉部では NPK 区 (0.60 g) が最も多く、次いで NK 区 (0.39 g) となり、子実部では NK 区 (2.40 g) が最も多く、次いで NPK 区 (1.94 g) となった（第 12 図）。窒素は含有率、吸収量ともに窒素施肥区が多い結果を示した。窒素肥料の利用率は NK 区で 52.1%, NPK 区で 47.7% であった（第 2 表）。



第9図 トウモロコシのN含有率 (%)



第10図 トウモロコシのP含有率 (%)

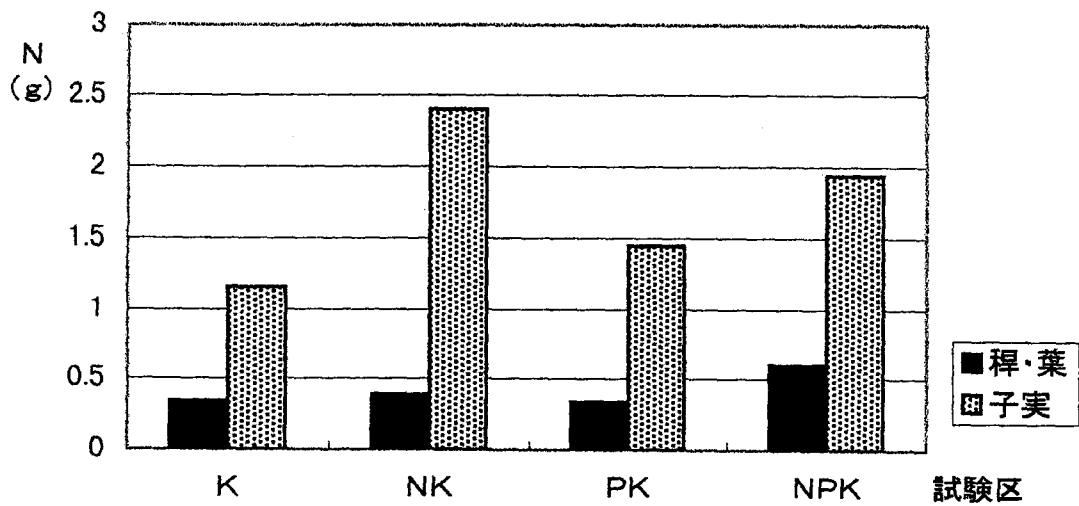


第11図 トウモロコシのK含有率 (%)

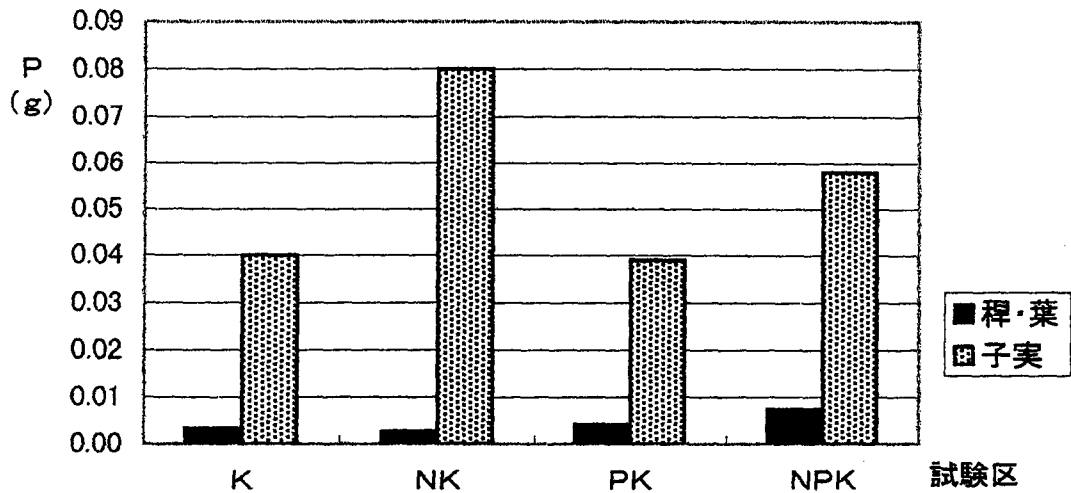
肥料三要素を連続施用したほ場におけるダイズおよびトウモロコシの無機成分の吸収

表—2 トウモロコシの肥料利用率 (%)

| 試験区 | 窒素利用率 | リン利用率 | カリウム利用率 |
|-----|-------|-------|---------|
| K | | | 35.9 |
| NK | 52.1 | | 56.6 |
| PK | | 0.38 | 41.2 |
| NPK | 47.7 | 0.58 | 60.0 |
| 平均値 | 49.9 | 0.48 | 48.4 |



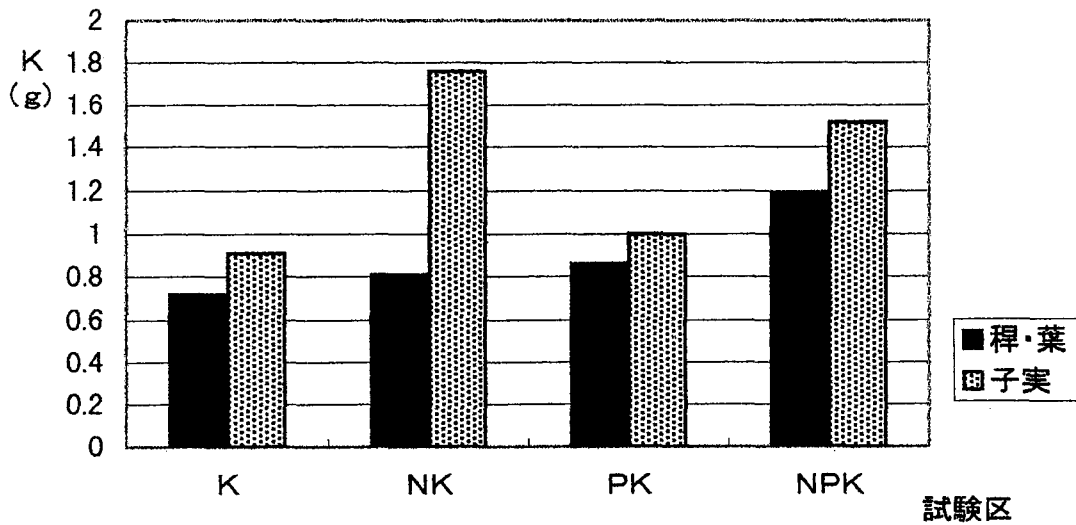
第12図 トウモロコシのN吸収量 (g/1株)



第13図 トウモロコシのP吸収量 (g/1株)

リンは含有率が低かったため肥料利用率も低い値となった (第13図)。すなわち PK 区が 0.38%, NPK 区が0.58%と極めて低い値となった。

カリウムについてみると、最も吸収量の多かったのは、稈・葉部では NPK 区で 1.19 g、子実



第14図 トウモロコシの K 吸収量 (g/1 株)

部は NK 区で 1.76 g であった (第14図)。肥料利用率は窒素と同様に平均 5 割程度であり、最も多い NPK 区で 60.0%，次いで NK 区が 56.6% であった (第2表)。

謝 辞

本研究で使用したほ場は、数多くの人々によって長年にわたり維持管理されたものである。これらの方々々に心から感謝申し上げる。また、この研究の機会を与えて下さった本学農学部江崎要教授にお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) 総合野菜 畑作技術事典 (1974) I 畑作物編 農業技術協会：100
- 2) 三井進午 (1991) 博友社 最新土壌・肥料・植物栄養辞典 増訂版 博友社：344
- 3) 土壌養分測定法委員会編 土壌養分分析法 (1981) (株)養賢堂：171-173
- 4) 土壌養分測定法委員会編 土壌養分分析法 (1981) (株)養賢堂：227-228
- 5) やさしい園芸セミナー図解 作物 (1987) 農業図書：58-62
- 6) 農業技術大系 土壌施肥編 (1994) 6 施肥の原理と施肥技術 農山漁村文化協会：211-212
- 7) 高橋英一，吉野 実，前田正男 (1990) 新版原色 作物の要素欠乏過剰症：82-107
- 8) 高井泰雄，早瀬達郎，熊沢喜久雄 (1980) 植物栄養土壌肥料大事典 養賢堂：689-691

肥料三要素の連続施用が大豆の収量および成分に およぼす影響

中林 和重, 箱崎 美義, 小堀 典子, 浅井 司

(2000年11月13日受理)

Effects of Continuous Yearly Use of Three Major Elements on Yield and the Amount of Inorganic Elements in Soybean

Kazushige NAKABAYASHI, Miyoshi HAKOZAKI, Noriko KOBORI, and Tsukasa ASAI

Summary

Meiji University farm has continuously used, three major elements (nitrogen, phosphate, potassium) for twenty-four years. In this study we investigated the influence of three fertilizers on the amount of inorganic element in soybeans and on their yield.

Yield and the amounts of five inorganic elements were highly influenced by phosphate fertilization. Mature grain contained high percentages of nitrogen, calcium and magnesium and there was a good of yield both grain and stems. Furthermore, phosphate fertilizer promoted absorption of inorganic elements.

緒 言

肥料の三要素試験は伝統的な方法であるが、長期間連用した圃場は少ない。本学農学部付属圃場には、肥料の3要素である窒素、リン酸、カリウムを24年間同じ施肥法で、与え続けてきた圃場があり、貴重な財産となっている^{1,2)}。

本研究では、その圃場で採れた大豆の収量調査および無機成分の分析を行い、肥料3要素の連続施用の影響について調査したので報告する。

材料および方法

栽培概要

1999年5月2日にエダマメ用品種‘三保白鳥’を播種した。肥培管理は一般栽培法にしたがって適切に行った。収穫は1999年7月24日に行った。使用した肥料は硫酸アンモニウム236 g/区 (N: 49.6 g/区), 過リン酸石灰377 g/区 (P_2O_5 : 66.0 g/区), 塩化カリウム177 g/区 (K_2O : 99.1

g/区)で、すべて元肥として与えた。

試験区

試験区は、肥料3要素(N, P, K)の施用の有無についての組み合わせ³⁾からなる3要因2水準の8試験区を3反復した、計24区である。1区(1.65×5.0 m)の面積は8.25 m²である。これらの試験区は若干の傾斜がある北側斜面に設けられているため、表土の流出と流入が認められる。このため、本研究では、これらの影響の少ない2反復分を調査対象とし、斜面上方と下方の位置による要因を含めて、4要因2水準の16試験区分を調査・分析の対象とした。

実験方法およびデータ処理

各試験区に生育している平均的な大きさの大豆3株を選び、収量調査を行ったのち、化学分析に供した。すなわち、収穫後、直ちに茎葉部(莢含む)、子実部(可食部)に分けて収量調査をした。その後85℃で通風乾燥し、微粉碎した。粉末試料は、過酸化水素硫酸混液を用いて、ケルダール分解⁴⁾をした。化学分析は、全窒素を水蒸気蒸留法で、リンをバナドモリブデン酸比色法⁵⁾で、カリウム、カルシウム、マグネシウムを原子吸光光度法で行った。これらの測定値を統計処理し、信頼度が90%を超える項目および試験要因について結果を図示して考察した。

結果および考察

収量調査結果

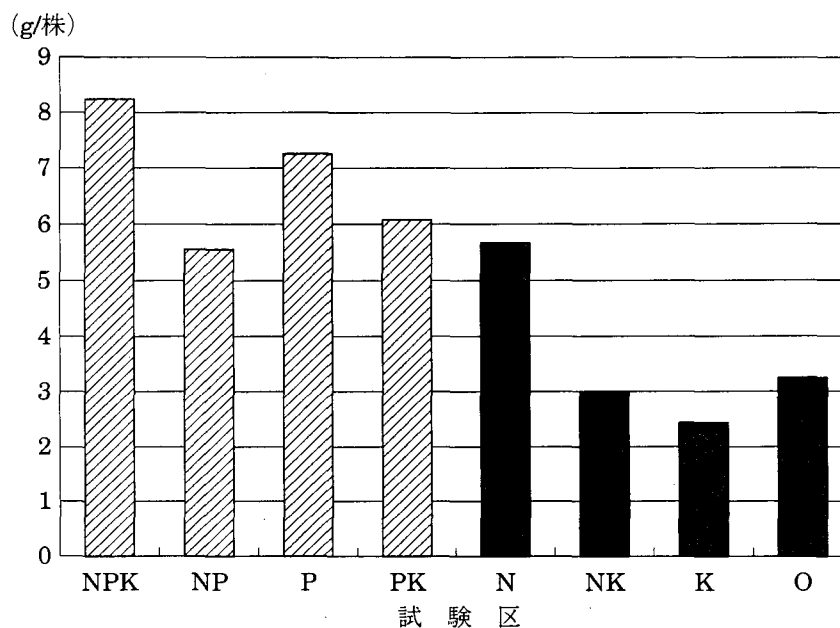
一株あたりの子実の乾燥重量はPを施用した試験区の平均値では、6.75 gを示し、無施用区の平均2.73 gの約2倍であった(信頼度92%)。茎葉部はP施用区の平均で10.77 gと、無施用区の平均値3.46 gの約3倍であった(信頼度95%)。試験区ごとに詳しくみると、子実部では、NPK区(8.20 g)で最も高く、次いでP区(7.25 g)、PK区(6.05 g)とつづき(第1図、第1表)、茎葉部では、NPK区(14.55 g)、PK区(10.75 g)、NP区(10.10 g)であった(第2図、第2表)。

化学分析結果

子実部

窒素、リン、カルシウム、マグネシウムおよびカリウムの含有率は、それぞれP施用区でP無施用区よりも高かった(第3図～第7図)。特にP施用が優位に働いたのは窒素含有率で、信頼度99.2%を得た(第3表)。窒素、カルシウムおよびマグネシウム含有率増加は、Pにこれらの元素の吸収促進作用があるため⁶⁾と考えられる。また、これらの結果を一般的な大豆の無機成

肥料三要素の連続施用が大豆の収量および成分におよぼす影響

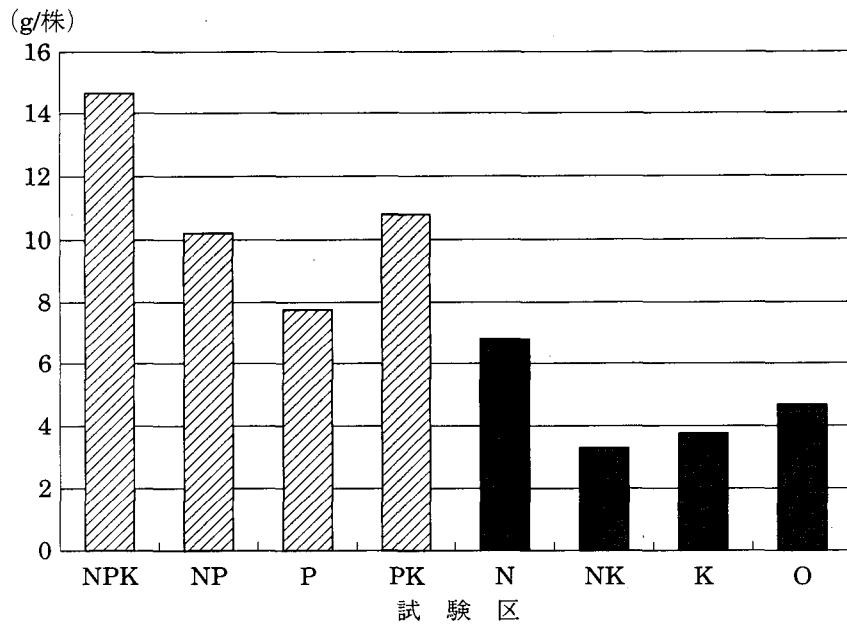


第 1 図 肥料三要素連続施用が大豆の子実の乾燥重量に及ぼす影響

第 1 表 子実部乾燥重量の分散分析表

| | | 要因 | 平方和 | 自由度 | 不偏分散 | F0 | 検定 | 確率 P |
|----|----|------|-------|-----|------|------|----|------|
| 1 | | A | 0.0 | 1 | 0.0 | 0.0 | | 0.89 |
| 2 | | B | 64.6 | 1 | 64.6 | 63.4 | | 0.08 |
| 3 | | AB | 0.1 | 1 | 0.1 | 0.1 | | 0.79 |
| 4 | | C | 0.3 | 1 | 0.3 | 0.3 | | 0.66 |
| 5 | | AC | 6.7 | 1 | 6.7 | 6.6 | | 0.24 |
| 6 | | BC | 0.9 | 1 | 0.9 | 0.8 | | 0.53 |
| 7 | | ABC | 1.7 | 1 | 1.7 | 1.6 | | 0.42 |
| 8 | | D | 1.5 | 1 | 1.5 | 1.5 | | 0.44 |
| 9 | | AD | 0.4 | 1 | 0.4 | 0.4 | | 0.65 |
| 10 | | BD | 0.7 | 1 | 0.7 | 0.7 | | 0.55 |
| 11 | | ABD | 22.8 | 1 | 22.8 | 22.4 | | 0.13 |
| 12 | | CD | 0.2 | 1 | 0.2 | 0.2 | | 0.72 |
| 13 | | ACD | 2.0 | 1 | 2.0 | 1.9 | | 0.40 |
| 14 | | BCD | 4.1 | 1 | 4.1 | 4.0 | | 0.30 |
| 15 | 誤差 | ABCD | 1.0 | 1 | 1.0 | | | |
| 16 | | 計 | 107.1 | 15 | | | | |

要因：A は窒素 (N), B はリン (P), C はカリウム (K) 肥料の施用の因子を, D は圃場における試験区の位置 (表示があれば上方) を示す。



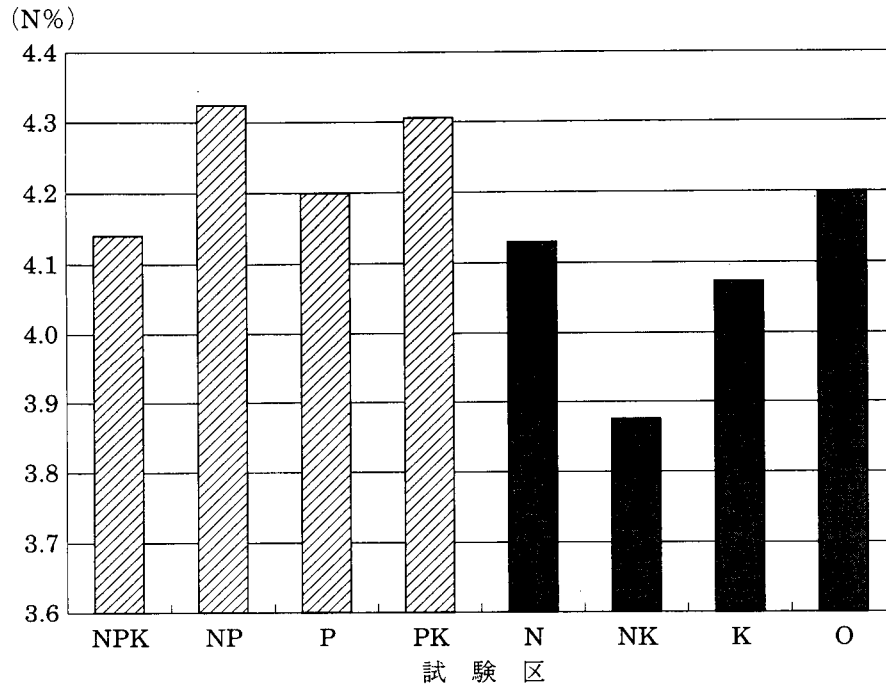
第 2 図 肥料三要素連続施用が大豆の茎葉の乾燥重量に及ぼす影響

第 2 表 茎葉部乾燥重量の分散分析表

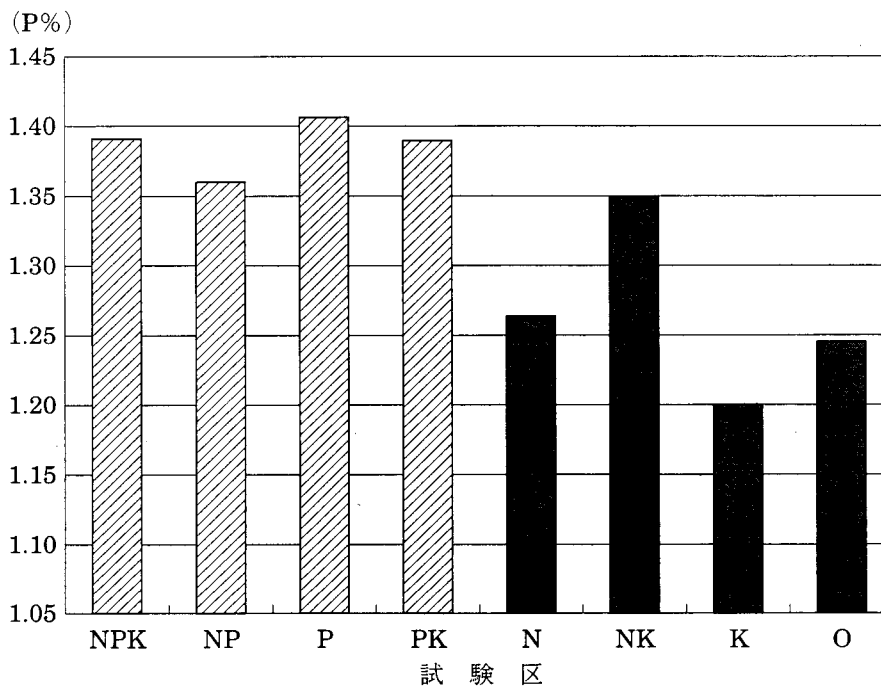
| | | 要因 | 平方和 | 自由度 | 不偏分散 | F0 | 検定 | 確率 P |
|----|----|------|-------|-----|-------|-------|----|------|
| 1 | | A | 2.9 | 1 | 2.9 | 2.9 | | 0.34 |
| 2 | | B | 213.5 | 1 | 213.5 | 212.5 | * | 0.04 |
| 3 | | AB | 21.1 | 1 | 21.1 | 21.0 | | 0.14 |
| 4 | | C | 14.9 | 1 | 14.9 | 14.8 | | 0.16 |
| 5 | | AC | 2.6 | 1 | 2.6 | 2.6 | | 0.35 |
| 6 | | BC | 14.2 | 1 | 14.2 | 14.1 | | 0.17 |
| 7 | | ABC | 0.1 | 1 | 0.1 | 0.1 | | 0.83 |
| 8 | | D | 3.4 | 1 | 3.4 | 3.3 | | 0.32 |
| 9 | | AD | 7.7 | 1 | 7.7 | 7.7 | | 0.22 |
| 10 | | BD | 0.8 | 1 | 0.8 | 0.8 | | 0.54 |
| 11 | | ABD | 3.0 | 1 | 3.0 | 2.9 | | 0.34 |
| 12 | | CD | 0.0 | 1 | 0.0 | 0.0 | | 0.93 |
| 13 | | ACD | 1.7 | 1 | 1.7 | 1.7 | | 0.42 |
| 14 | | BCD | 8.9 | 1 | 8.9 | 8.9 | | 0.21 |
| 15 | 誤差 | ABCD | 1.0 | 1 | 1.0 | | | |
| 16 | | 計 | 295.7 | 15 | | | | |

要因：A は窒素 (N), B はリン (P), C はカリウム (K) 肥料の施用の因子を, D は圃場における試験区の位置 (表示があれば上方) を示す。

肥料三要素の連続施用が大豆の収量および成分におよぼす影響

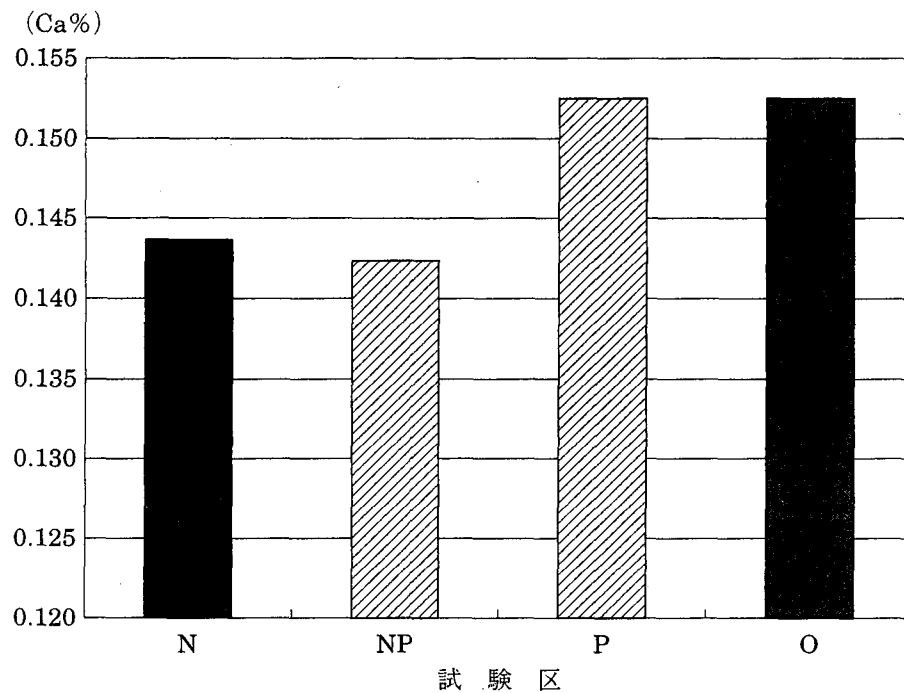


第3図 肥料三要素連続施用が大豆の子実部の窒素含有率に及ぼす影響

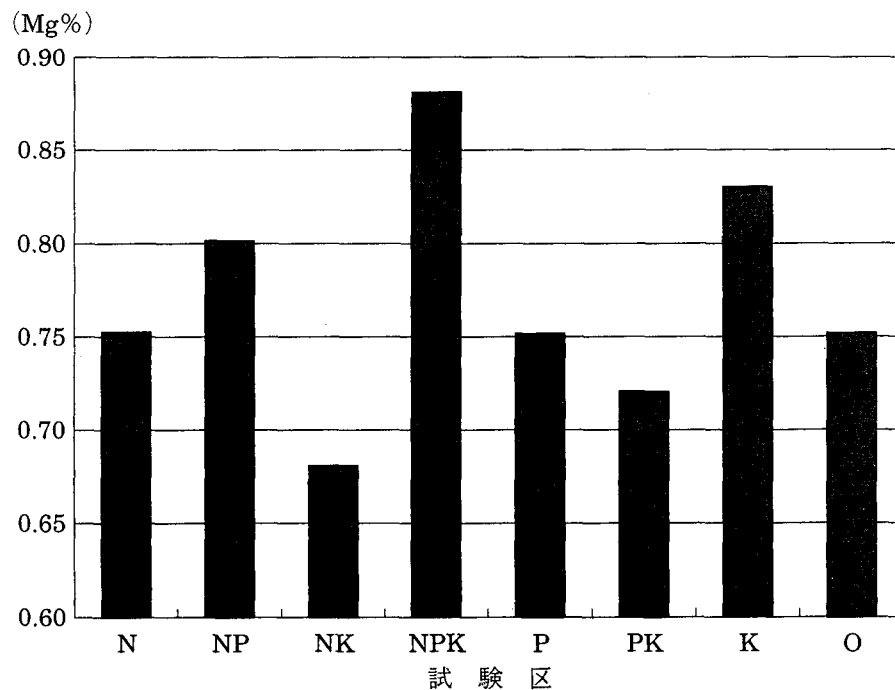


第4図 肥料三要素連続施用が大豆の子実部のリン含有率に及ぼす影響

分含有率⁷⁾と比較すると、リン、カリウム、カルシウムおよびマグネシウム含有率は一般的な値と同程度またはそれ以上であり、窒素含有率だけが顕著に低かった。これは、窒素の連続施用の影響と思われる。すなわち、N施用区で24年間Nを施肥し続けたため土壌が窒素過剰になり、



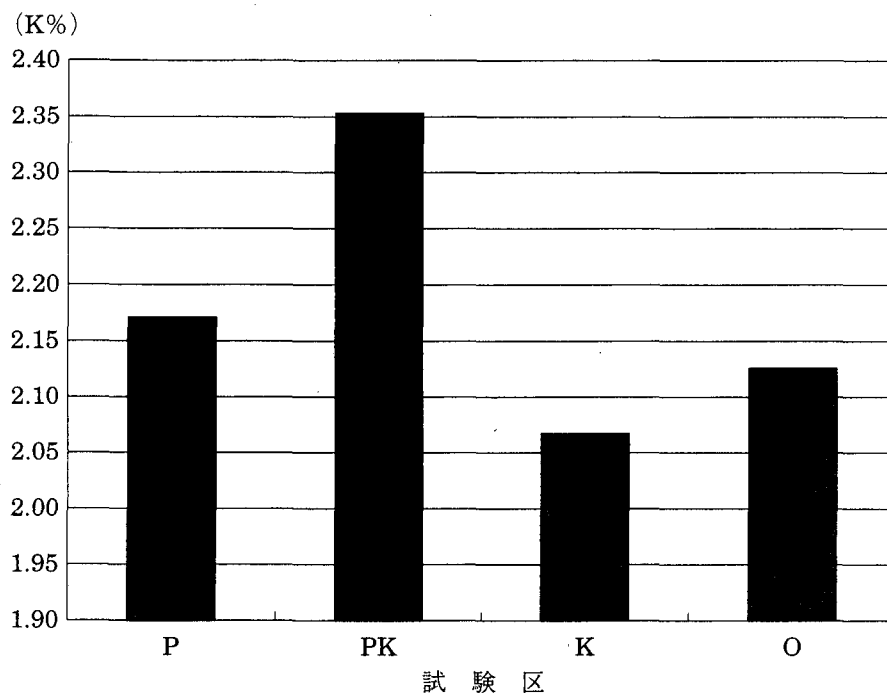
第5図 肥料三要素連続施用が大豆の子実部のカルシウム含有率に及ぼす影響



第6図 肥料三要素連続施用が大豆の子実部のマグネシウム含有率に及ぼす影響

根粒の着生を阻害し、根粒菌の活動を低下させた⁸⁾ことによるものと考えられる。一方、N無施用区では、土壤中に窒素が欠乏しすぎたのではないかと考えられる。土壤中の肥料成分について、さらなる研究が必要と考えられる。

肥料三要素の連続施用が大豆の収量および成分におよぼす影響

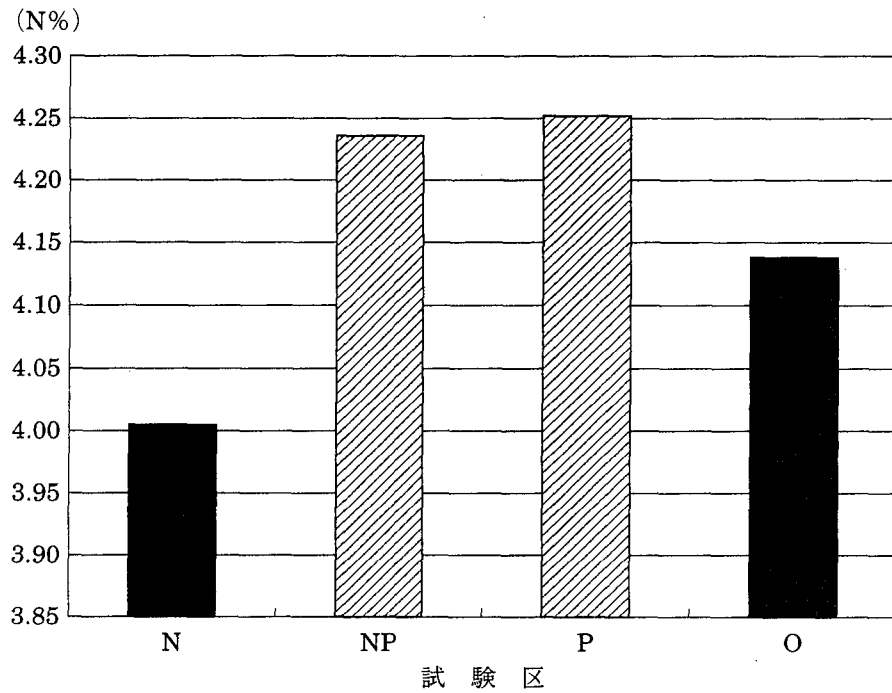


第7図 肥料三要素連続施用が大豆の子実部のカリウム含有率に及ぼす影響

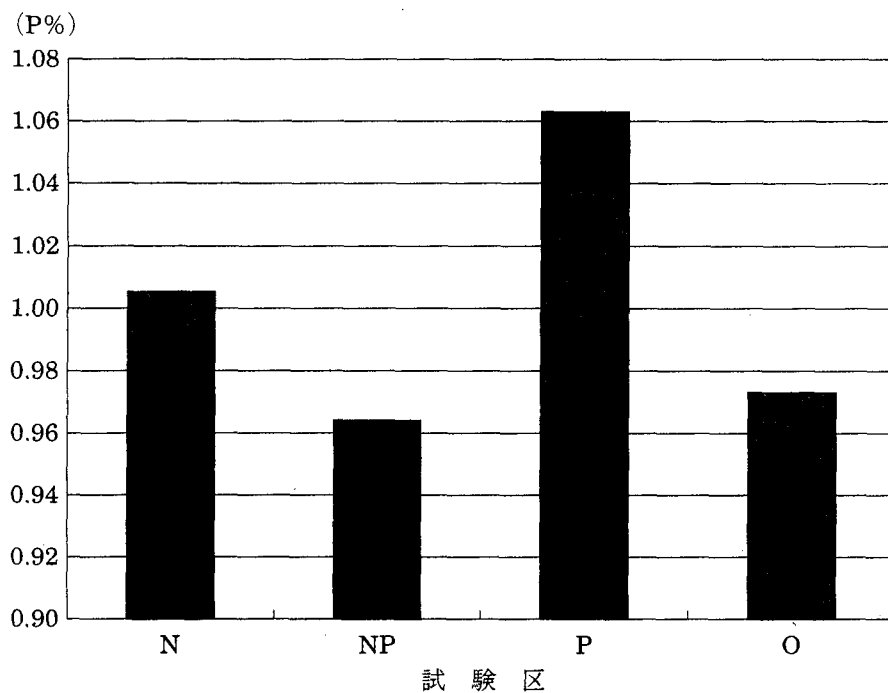
第3表 子実中窒素含有率の分散分析表

| | | 要因 | 平方和 | 自由度 | 不偏分散 | F0 | 検定 | 確率 P |
|----|----|------|------|-----|-------|----------|----|-------|
| 1 | | A | 0.02 | 1 | 0.021 | 189.377 | * | 0.046 |
| 2 | | B | 0.12 | 1 | 0.117 | 1044.592 | * | 0.02 |
| 3 | | AB | 0.01 | 1 | 0.014 | 120.691 | | 0.058 |
| 4 | | C | 0.05 | 1 | 0.051 | 450.766 | * | 0.03 |
| 5 | | AC | 0.05 | 1 | 0.045 | 400.188 | * | 0.032 |
| 6 | | BC | 0.02 | 1 | 0.023 | 207.982 | * | 0.044 |
| 7 | | ABC | 0.01 | 1 | 0.006 | 49.079 | | 0.09 |
| 8 | | D | 0.06 | 1 | 0.056 | 494.832 | * | 0.029 |
| 9 | | AD | 0.01 | 1 | 0.006 | 55.188 | | 0.085 |
| 10 | | BD | 0.18 | 1 | 0.177 | 1575.894 | * | 0.016 |
| 11 | | ABD | 0.00 | 1 | 0.004 | 32.008 | | 0.111 |
| 12 | | CD | 0.00 | 1 | 0 | 3.473 | | 0.314 |
| 13 | | ACD | 0.01 | 1 | 0.012 | 103.385 | | 0.062 |
| 14 | | BCD | 0.06 | 1 | 0.059 | 522.592 | * | 0.028 |
| 15 | 誤差 | ABCD | 0.00 | 1 | 0 | | | |
| 16 | | 計 | 0.59 | 15 | | | | |

要因：Aは窒素（N）、Bはリン（P）、Cはカリウム（K）肥料の施用の因子を、Dは圃場における試験区の位置（表示があれば上方）を示す。



第 8 図 肥料三要素連続施用が大豆の茎葉部の窒素含有率に及ぼす影響

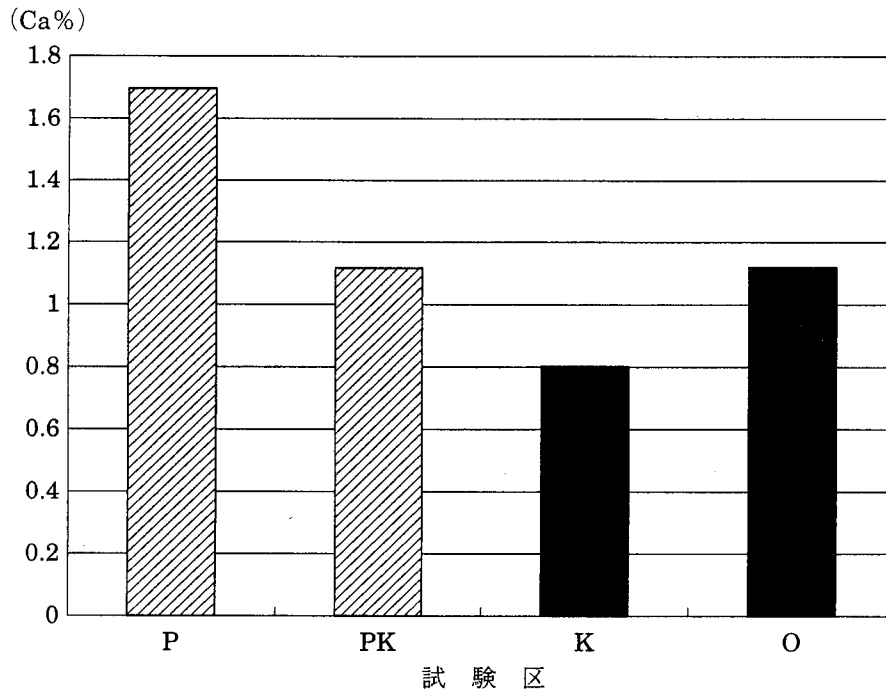


第 9 図 肥料三要素連続施用が大豆の茎葉部のリン含有率に及ぼす影響

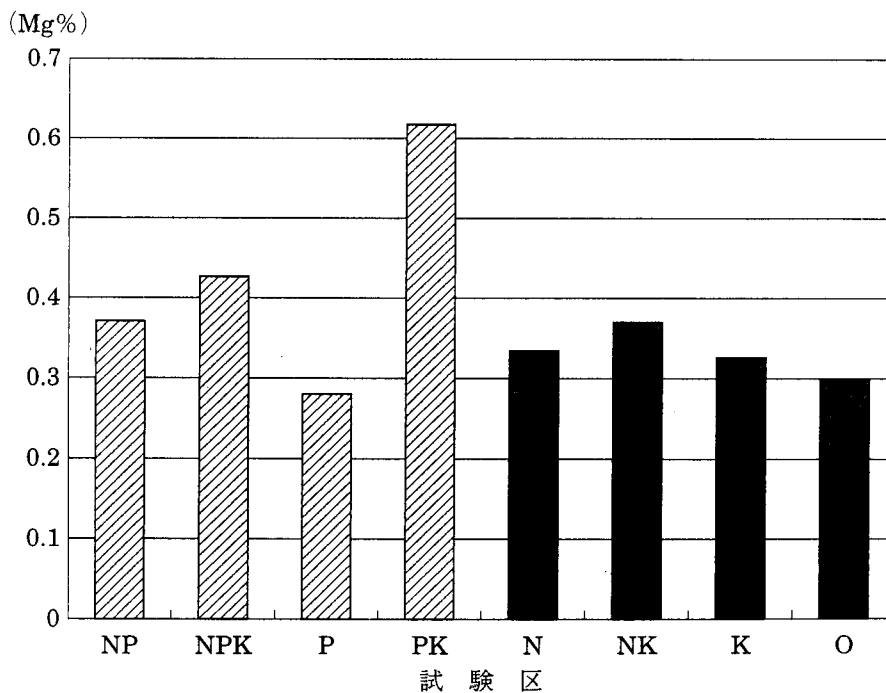
茎葉部

窒素, カルシウムおよびマグネシウム含有率が P 施用区で P 無施用区よりも高くなった。これも, 上述の P による吸収促進作用のためと思われる (第 8, 10, 11 図)。リン含有率は, N 施用

肥料三要素の連続施用が大豆の収量および成分におよぼす影響

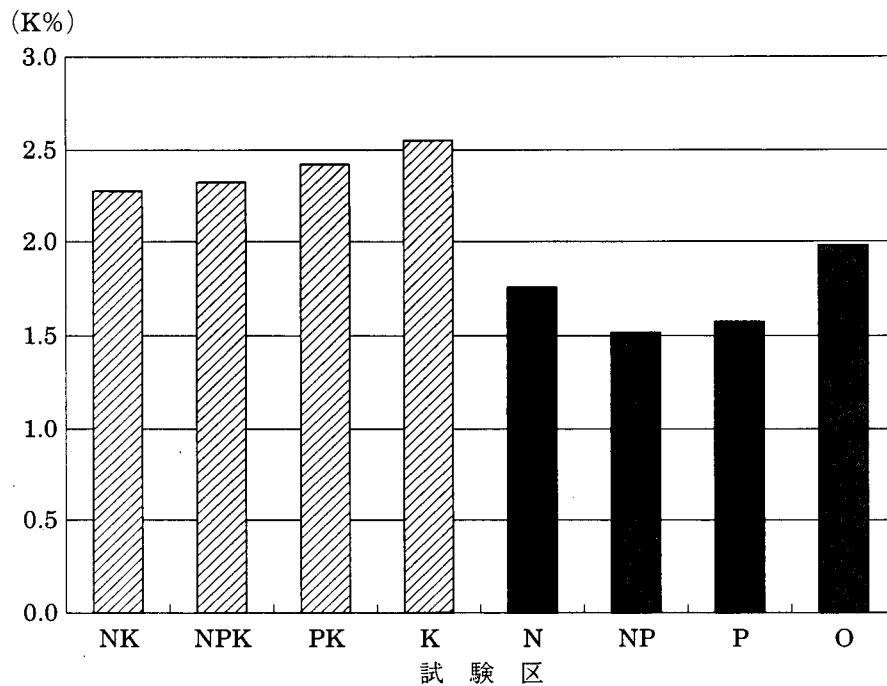


第10図 肥料三要素連続施用が大豆の茎葉部のカルシウム含有率に及ぼす影響

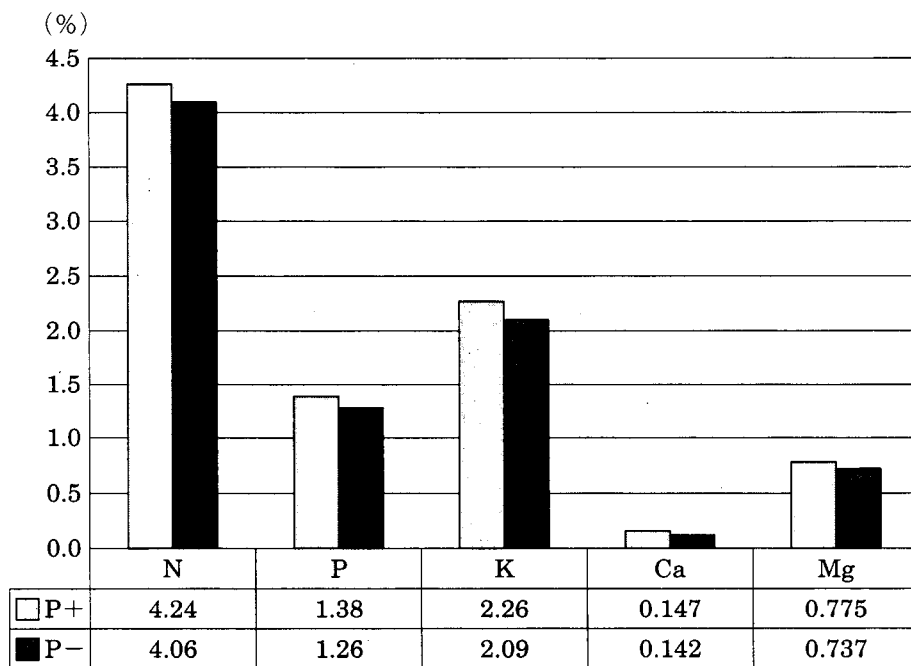


第11図 肥料三要素連続施用が大豆の茎葉部のマグネシウム含有率に及ぼす影響

区でN無施用区より低くなり（第9図），カリウム含有率はK施用区でK無施用区より高くなった（第12図）。カリウム肥料は，エダマメ栽培基準⁹⁾の1.5倍施用したので，カリウムのぜいたく吸収¹⁰⁾によるものと思われる。これら茎葉部中の無機成分含有率の多少も一般の大豆と比較



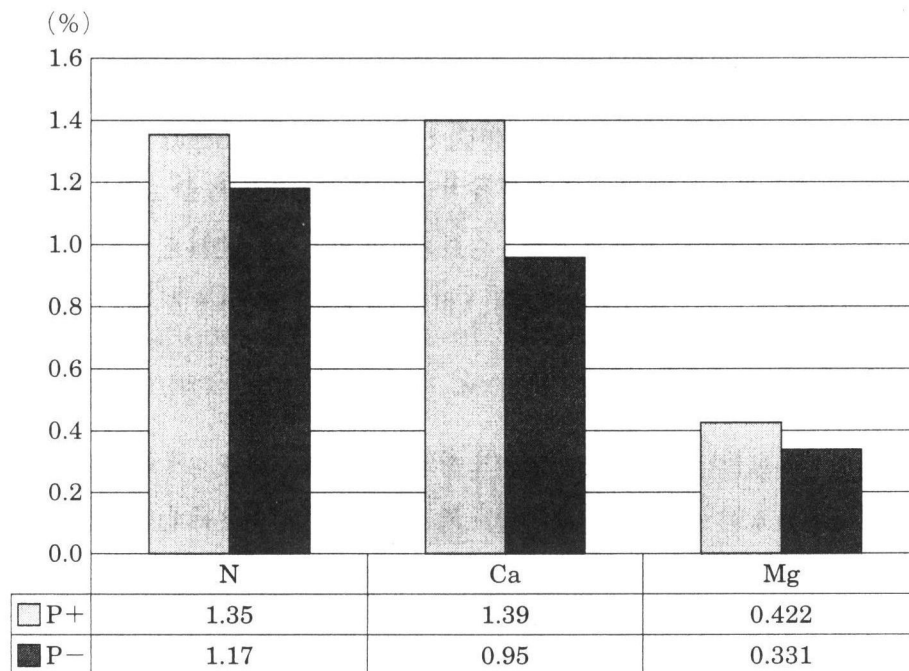
第12図 肥料三要素連続施用が大豆の茎葉部のカリウム含有率に及ぼす影響



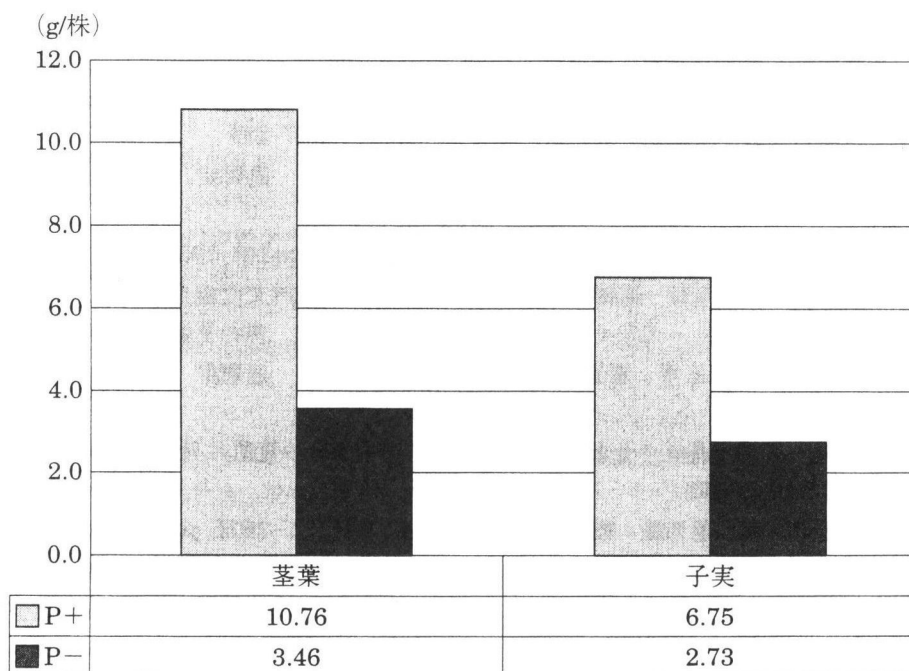
第13図 肥料三要素連続施用が大豆の子実部の無機成分 5 元素の含有率に及ぼす影響

してみると、子実部と同様の傾向があった。

肥料三要素の連続施用が大豆の収量および成分におよぼす影響



第14図 肥料三要素連続施用が大豆の茎葉部の N, Ca, Mg の含有率に及ぼす影響



第15図 肥料三要素連続施用が大豆の茎葉および子実の乾燥重量に及ぼす影響

無機成分含有率と収量の関係

以上の結果は、第13, 14および15図の3つのグラフにまとめることができる。すなわち、収量および無機成分5元素の含有率は肥料3要素のうちPの施用に強く影響を受けていたと思われ

る。子実部では、無機成分5元素の含有率はどれもP施用区で高く(第13図)、茎葉部でも、窒素、カルシウムおよびマグネシウムの含有率がP施用区で高かった(第14図)。また、収量をみると、子実部および茎葉部ともに、P施用区で高かった(第15図)。このようにP施用区で、無機成分吸収が促され、作物体が大きくなり、収量増加につながったのは土壌が黒ボク土¹¹⁾で、Pの肥効が現れやすかったためと考えられる。また、リン肥料として与えた過リン酸石灰がSO₃とCaOを含有しており¹²⁾(SO₃27.5%, CaO29.4%), SとCaを多く吸収する大豆¹³⁾に向いていたと考えられる。

謝辞 本研究で使用した試料は、数多くの植物生産実習関係者らによって長年にわたり維持管理された圃場から採取したものである。生産管理に携わった多くの方々に心からお礼申し上げる。

また、本研究の機会を下さった本学部江崎 要教授にお礼申し上げる。

引用文献

- 1) 中林, 箱崎, 小堀, 浅井: 肥料三要素の連続施用が大豆の収量および無機成分に及ぼす影響, 日本作物学会関東支部会報 第14号, 日本作物学会関東支部, 1999, pp48-49
- 2) 中林, 箱崎, 村越, 河野: 肥料三要素を連続施用したほ場におけるダイズおよびトウモロコシの無機成分の吸収, 明治大学農学部研究報告 第119号, 1999, pp33-42
- 3) 奥野忠一, 芳賀敏郎: 実験計画法, 培風館, 1969, pp100-108
- 4) 土壌養分測定法委員会編: 土壌養分分析法, 養賢堂, 1981, pp171-176
- 5) 土壌養分測定法委員会編: 土壌養分分析法, 養賢堂, 1981, pp227-229
- 6) 高橋英一, 吉野 実, 前田正男: 新版 原色 作物の要素欠乏・過剰症, 農山漁村文化協会, 1980, p86, 114, 129
- 7) 香川芳子監修: 四訂 食品成分表, 女子栄養大学出版部, 2000, pp104-105
- 8) 農文協編: 畑作全書 マメ類編—基礎生理と応用技術—, 農山漁村文化協会, 1981, pp75-78
- 9) 本多藤雄監修: 野菜栽培シリーズ③マメ・根菜の上手なつくり方, 家の光協会, 1987, pp38-40
- 10) 高橋英一, 吉野 実, 前田正男: 新版 原色 作物の要素欠乏・過剰症, 農山漁村文化協会, 1980, pp103-104
- 11) 江崎, 中矢, 高橋, 柳澤: 黒ボク土畑地の表土厚さが土中水分の変動に及ぼす影響, 農業土木学会論文集, No. 208, 2000, p145-153
- 12) 高井康雄, 早瀬達郎, 熊沢喜久雄: 植物栄養肥料大事典, 養賢堂, 1976, pp1132-1134
- 13) 高井康雄, 早瀬達郎, 熊沢喜久雄: 植物栄養肥料大事典, 養賢堂, 1976, pp689-690, 1096

化学肥料 3 要素の連続施用が連作エダマメの生育および収量に及ぼす影響

山下 義幸
箱崎 美義
内藤 忠雄

Effects of Continuous Yearly Use of Three Major Nutrients of Chemical Fertilizer on Growth and Yield of Sequentially Cultivated Green Soybean

Yoshiyuki YAMASHITA
Miyoshi HAKOZAKI
Tadao NAITO

Department of Agriculture
School of Agriculture, Meiji University
1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa-ken, 214-8571
Received May 7, 2001: Accepted July 17, 2001

Synopsis : This study was carried out to clarify the effects of the three major nutrients provided by chemical fertilizer for successive 27 years on the growth and yield of green soybeans (*Glycine max* Merr.). The phosphorus fertilizing stimulated the growth of stems and leaves, while only potassium or no fertilizer was inferior to the other fertilizer treatments for these characteristics. The phosphorus fertilizing stimulated the growth of the pod setting and green seed production, while potassium or nitrogen only and nitrogen plus potassium showed the lowest values among all fertilizers. The total top and root fresh weight per plant increased two times using nitrogen plus phosphorus or nitrogen plus phosphorus plus potassium to no fertilizing, while potassium only showed an increase of 0.8 times the lowest value among all fertilizers. The results suggest that the yield increase of pod and green beans requires the use of superphosphate fertilizing.

緒 言

ダイズは根に根粒を形成し、根粒菌が空中窒素を固定するので、一般に少肥施用とするが、エダマメは実採り栽培に比べ、多肥施用される。これは窒素の効果が高いこと、またやせ土では、子実の収量や風味が劣るためである¹⁾。しかし、化学肥料 3 要素のうち、とくに窒素が過多であると、草勢が強くて分枝数が増え、着莢が不揃いで、空莢や 1 粒莢が増加する²⁾が、リン酸施用によって茎葉、莢、子実量とも増える³⁾。

肥料の 3 要素施肥試験は伝統的な方法であるが、長期間化学肥料だけを連用し、同じ作物を連作した畑地は少ない。本学農学部には、エダマメの標準量の肥料 3 要素である窒素、リン酸およびカリウムを 1972 年から 1999 年までの 27 年間、同じ施肥法で施用し、エダマメ栽培を続けて

きた、貴重な試験ほ場があるが⁴⁾⁵⁾⁶⁾。このような、ほ場におけるエダマメの実験報告は皆無である。

そこで本研究では、前述のほ場において 1997 年、1998 年および 1999 年の 3 カ年にわたり、連作したエダマメの生育および収量に及ぼす影響について調べた。ここに 3 カ年とも同じような実験結果が得られたので、主として 1999 年の結果について報告する。

材料および方法

栽培概要

栽培品種はエダマメ用の白鳥（早生、褐毛、日東農産種苗 kk）を用いた。は種は 1999 年 5 月 3 日、耕起、作条後、施肥全量を元肥として作条溝に施与し、間土上に畦間 55 cm 株間 25 cm の栽植距離で、1 株当たり 3 粒の点播とし

た。6月上旬に間引いて1株当たり1植物体仕立てとした。肥培管理はすべて一般慣例法に準拠し適宜実施した。収穫は子実が緑熟に達した1999年7月25日に行った。調査は生葉数と主茎長について7日ごとに、試験終了時(7月25日)に各区とも生育中庸の20個体、3反復の計60個体を選び、茎、葉、莢実および子実の生体について計測した。

試験区設定

試験区は10a当たりエダマメ標準施肥成分量をN:6.0 kg、 P_2O_5 :8.0 kgおよび K_2O :12.0 kgとし、化学肥料の3要素、すなわち、N、P、Kの施用組み合わせにより、N区(窒素施用区)、P区(リン酸施用区)、K区(カリウム施用区)の単一要素3区、NP区(窒素・リン酸施用区)、NK区(窒素・カリウム施用区)、PK区(リン酸・カリウム施用区)の2要素組み合わせ3区、NPK区(窒素・リン酸・カリウム施用区)の3要素組み合わせ1区およびO区(無施用区)1区の8施用区について3反復の計24試験区を設けた。使用した化学肥料は、Nは硫酸アンモニウム(アンモニア態窒素21%、N:49.5 g/区)、Pは過リン酸石灰(可溶性リン酸17%、 P_2O_5 :66.0 g/区) Kは(水溶性カリ56%、 K_2O 99.0 g/区)で、全量を元肥として施与した。1区面積は5.0×1.65mの8.25 m²とした。区制は1区当たり3連制の3反復で、乱塊法により配置した(Fig. 1.)。

結 果

1) 化学肥料 3要素連用が連作エダマメ茎葉部の生育に及ぼす影響

試験中における主茎から発生した成(複)葉増加数の推移(Fig. 2.)は各区とも生育経過とともに増加し、NP区とNPK両区は他区に比べ、生育初期から終始上位で、とくにNP区が最多値を保ったが、O区のそれは各期とも最少値で劣った。主茎の伸長生長の推移(Fig. 3.)は成葉増加と同様に、各区とも発芽後、生育経過とともに伸長し、とく

| | | | | | |
|----|-----|-----|----|----|-----|
| O | K | NK | N | N | NPK |
| P | PK | K | NP | O | NK |
| NP | NK | PK | O | P | PK |
| N | NPK | NPK | P | NP | K |

Fig. 1. Arrangement of experimental plots.

O: non-fertilizer application. N: Ammonium sulfate.

P: superphosphate. K: potassium chloride.

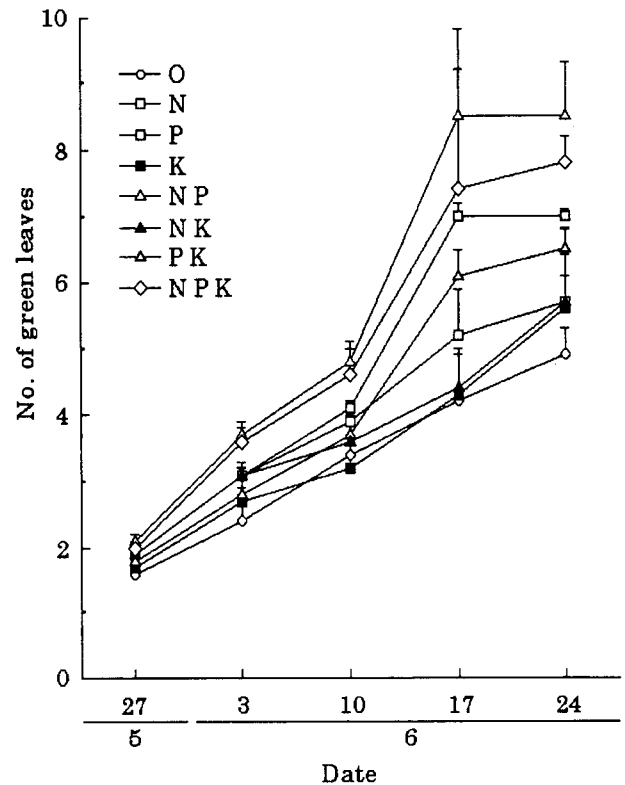


Fig. 2. Changes in number of green leaves during the experimental period (1999).

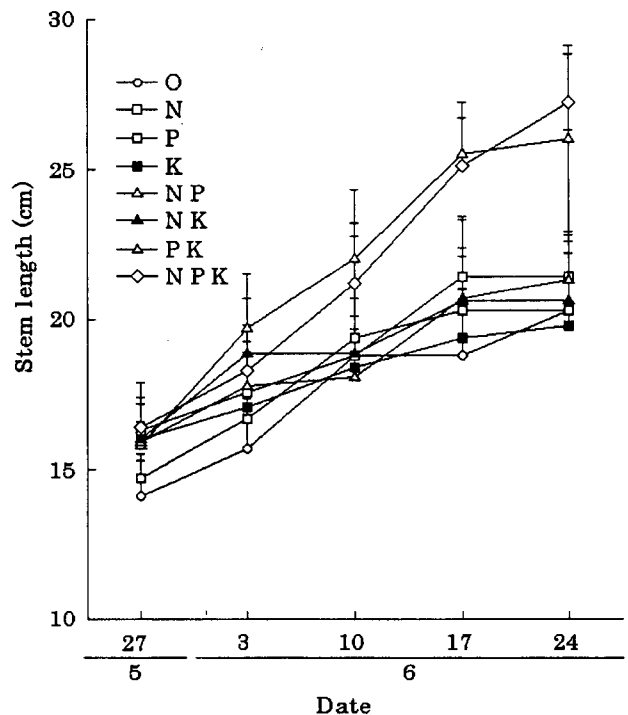


Fig. 3. Changes in stem length during the experimental period (1999).

化学肥料3要素の連続施用が連作エダマメの生育および収量に及ぼす影響

にNP区とNPK両区は他区に比べ、終始優っており、O区とK両区は6月10日以降、緩慢となったが、各区に著しい伸長差はみられなかった。

実験終了時7月25日における茎葉部の生育 (Table 1) をみると、草丈では、NP区とNPK両区が44 cm以上で高く、NK区、K区とOの3区は33 cm以下で伸長が劣った。主茎長では、草丈同様に、O区に対しNPK区が1.5倍で最も高く、次いでNP区1.3倍、他区はいずれも1.2

倍以下の伸長であった。主茎節数、生葉数および第一次分枝には著しい区間差はなかった (Table 1)。次に、茎葉および根の生体重 (Table 2) をみると、茎生体重では、NK区とNPK両区が、生葉および根の生体重では、P区、NP区、PK区とNPK区の4区が、他区に比べ、それぞれ多かった。茎、葉と根の総生体重では、NP区とNPK区の2区が他区に比べ重く、O区の2.3倍以上であったが、K区だけが0.9倍で少なかった (Table 2)。

Table 1. Effects of three major nutrients on leaf and stem growth in green soybean (25 July 1999)^z.

| Experimental plot | Plant length (cm) | Main stem length (cm) | R·C ^x | No. nodes of main stem | No. of green leaves | No. primary branches of main stem |
|-------------------|----------------------|-----------------------|------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| O | 32.1 bc ^y | 18.6 bcd | 1 | 6.7 b | 8.5 ab | 3.2 a |
| N | 36.0 bc | 22.8 bc | 1.23 | 6.9 b | 5.1 b | 3.2 a |
| P | 37.0 bc | 19.7 bcd | 1.06 | 8.5 a | 11.0 a | 3.6 a |
| K | 32.0 bc | 19.8 bcd | 1.06 | 7.6 a | 7.9 ab | 2.8 b |
| NP | 44.5 a | 24.9 b | 1.34 | 8.4 a | 6.6 b | 2.9 b |
| NK | 33.0 bc | 22.2 bc | 1.19 | 6.6 b | 6.8 b | 3.0 a |
| PK | 38.9 bc | 21.3 bc | 1.15 | 8.9 a | 10.5 a | 3.3 a |
| NPK | 47.8 a | 28.2 a | 1.52 | 8.8 a | 11.5 a | 3.8 a |

^z Values represent the mean of three replications, n = 60 (20×3).

^y Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

^x Ratio of main stem length to non-fertilizer plot.

Table 2. Effects of three major nutrients on fresh weight of top and root in green soybean (25 July 1999)^z.

| Experimental plot | Fresh weight per plant (g) | | | | R·C ^x |
|-------------------|----------------------------|----------|----------|------------------|------------------|
| | Stem (a) | Leaf (b) | Root (c) | Total (a+b+c)(d) | |
| O | 2.4 b ^y | 5.7 b | 1.5 b | 9.6 b | 1 |
| N | 3.0 b | 5.5 b | 1.3 b | 9.8 b | 1.02 |
| P | 4.4 b | 10.1 a | 2.5 a | 17.0 b | 1.77 |
| K | 2.3 b | 5.4 b | 1.3 b | 9.0 b | 0.94 |
| NP | 6.2 b | 13.7 a | 2.9 a | 22.8 a | 2.38 |
| NK | 7.8 a | 9.1 b | 1.4 b | 18.3 b | 1.91 |
| PK | 4.4 b | 10.4 a | 2.6 a | 17.4 b | 1.81 |
| NPK | 10.6 a | 14.1 a | 3.1 a | 27.8 a | 2.90 |

^z Values represent the mean of three replications, n = 60 (20×3).

^y Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

^x Ratio of total fresh weight to non-fertilizer plot.

2) 化学肥料3要素連用が連作エダメ英・子実の収量に及ぼす影響

1株当たり子実粒数別着莢数 (Table 3) は1粒莢数と2粒莢数では、NP区とNPK両区が他区に比べ、それぞれ多かったが、K区は最も少なかった。3粒莢数では、P区が3.8で最も多く、N区が1.7で最少であった。着莢総数はO区に対し、NPK区が1.9倍で最多となり、次いでNP区1.7倍、P区1.4倍、PK区1.3倍の順とな

り、K区は0.7倍で最も低かった (Table 3)。

次に1株当たり緑熟した莢実粒数別莢実生体重 (Table 4) は、1粒莢実重では、NP区とNPK両区は他区に比べ増加し、K区が最も軽かった。2粒莢実重と3粒莢実重では、NP区、P区とNPK区の3区が、他区に比べそれぞれ多かった。これら粒数別莢実総数生体重では、O区に対し、P区、NP区、PK区とNPK区の4区が1.4倍以上と増加したが、K区とNK両区は0.8倍で少なかった。

Table 3. Effects of three major nutrients on mature green pods in green soybean (25 July, 1999) ^z.

| Experimental plot | No. of mature green pod per plant | | | | R·C ^x |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------|------------------|
| | One-grain pod (e) | Two-grains pod (f) | Three-grains pod (g) | Total (e+f+g) (h) | |
| O | 3.2 b ^y | 4.6 bc | 2.5 b | 10.3 bc | 1 |
| N | 3.8 b | 4.2 bc | 1.7 bc | 9.7 bc | 0.94 |
| P | 4.0 b | 6.9 bc | 3.8 a | 14.7 b | 1.43 |
| K | 2.0 bc | 4.2 bc | 1.8 bc | 8.0 bc | 0.78 |
| NP | 6.5 a | 8.0 a | 2.5 b | 17.0 a | 1.65 |
| NK | 2.9 b | 4.1 bc | 2.0 b | 9.0 bc | 0.87 |
| PK | 4.0 b | 6.6 bc | 2.8 b | 13.4 b | 1.30 |
| NPK | 7.3 a | 9.8 a | 2.5 b | 19.6 a | 1.90 |

^z Values represent the mean of three replications, n = 60 (20×3).

^y Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

^x Ratio of total pod to non-fertilizer plot.

Table 4. Effects of three major nutrients on fresh weight of mature green pods in green soybean (25 July, 1999) ^z.

| Experimental plot | Fresh weight of mature green pod per plant (g) | | | | R·C ^x |
|-------------------|--|--------------------|----------------------|-------------------|------------------|
| | One-grain pod (i) | Two-grains pod (j) | Three-grains pod (k) | Total (i+j+k) (l) | |
| O | 3.1 b ^y | 7.9 b | 6.8 b | 17.8 b | 1 |
| N | 4.5 b | 9.6 b | 5.1 b | 19.2 b | 1.08 |
| P | 5.2 b | 12.8 a | 9.8 a | 27.8 a | 1.56 |
| K | 2.4 bc | 7.3 b | 4.9 b | 14.6 bc | 0.82 |
| NP | 7.5 a | 16.9 a | 7.6 a | 32.0 a | 1.80 |
| NK | 3.1 b | 8.0 b | 3.6 bc | 14.7 bc | 0.83 |
| PK | 4.4 b | 13.6 a | 7.0 b | 25.0 a | 1.46 |
| NPK | 8.4 a | 18.6 a | 9.4 a | 36.4 a | 2.04 |

^z Values represent the mean of three replications, n = 60 (20×3).

^y Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

^x Ratio of total grain pod to non-fertilizer plot.

化学肥料3要素の連続施用が連作エダマメの生育および収量に及ぼす影響

1株当たり緑熟子実総数 (Table 5) はO区に対し、N P K区 1.7倍、NP区 1.5倍、P区 1.4倍以上と増加し、N区、K区とNKの3区は0.8倍以下で少なかった。茎・葉と着莢をプラスした地上部総生体重 (Table 5) はO区に対しNPとNPK両区が2倍以上に増加し、K区が0.8倍以下で最も軽かった。T-R率 (Table 5) はN区、NP区、NK区とNPKの4区は18倍以上の高率であったが、他区は17倍以下であった。

試験期間中の5月から7月までにおける5日ごとの気温推移 (Fig. 4.) をみると、最高気温は22~30℃範囲であり、その平均は26℃前後、最低気温は14~26℃範囲、その平均は19.6℃であり、本試験エダマメの栽培が生育適温である¹⁾²⁾³⁾25~30℃範囲の気温条件下にあった。

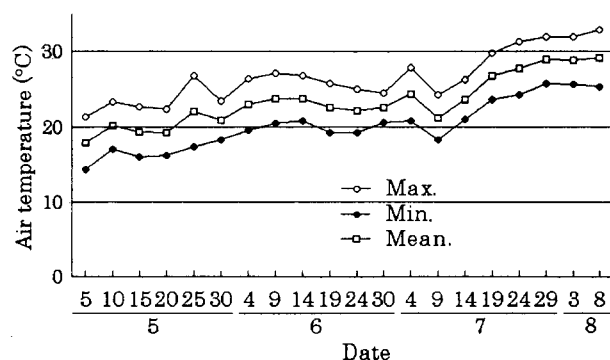


Fig. 4. Seasonal changes of air temperature (5-day mean) during the experimental period (1999).

考 察

化学肥料3要素の窒素、リン酸およびカリウムを1972年から1999年までの27年間、同じ施肥法で施用し、エダマメ栽培を続けてきた試験ほ場において本研究を実施したそのほ場の各試験区土壌を1998年に分析した。その結果、各試験区のN、P、K、CaおよびMg要素の含有率 (Table 6) はリン酸の施用区は無窒素でも窒素含有率が高く、エダマメの窒素吸収が促進する傾向¹³⁾がみられた。また、リン酸の施用はPとCaの含有率が高くなる傾向¹³⁾がみられた。カリウムの施用は無カリウム区でKの含有率が低く、CaとMgの含有率が高くなる傾向¹³⁾がみられた。

本研究において、1997年、1998年および1999年の3ヵ年にわたり栽培したエダマメの主な調査結果 (Table 7) をみると、主茎長、緑熟子実数、緑熟莢実重、地上部全体重および一株全体重は施肥区間に意差がみられたが、3ヵ年ともほぼ類似していることから、本報では、1999年の実験結果について検討した。

主茎からの出葉はP単独またはNP、PKとNPKの組み合わせ施用によって、他の組み合わせ施用に比べ、生育初期から収穫までの期間、終始増加の推移を示した。このようにP施用はエダマメの発芽後、主茎の伸長とともに葉の形成・増加に対して有効に働いたものと考えられる。は種84日後の7月25日収穫時における草丈、生葉数はPK、NPKの組み合わせ施用でそれぞれ大きな値を示し、施用要素の違い間に有意差がみられた。生存

Table 5. Effects of three major nutrients on fresh weight of green pod and T-R ratio in green soybean (25 July, 1999)².

| Experimental plot | No. of mature green grain per plant | R·C ^x | Top fresh weight (a+b+l)(m)(g) | Whole plant fresh weight (c+m)(g) | R·C | T-R ratio |
|-------------------|-------------------------------------|------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------|-----------|
| O | 19.9b ^y | 1 | 25.9bc | 27.4bc | 1 | 17.3b |
| N | 17.3bc | 0.87 | 27.7bc | 29.0bc | 1.06 | 21.0a |
| P | 29.2a | 1.47 | 42.3b | 44.8a | 1.64 | 16.9b |
| K | 15.8bc | 0.79 | 22.3bc | 23.6bc | 0.86 | 17.2b |
| NP | 30.0a | 1.51 | 51.9a | 54.8a | 2.00 | 17.9a |
| NK | 17.1bc | 0.86 | 31.6bc | 33.0bc | 1.20 | 22.6a |
| PK | 25.6b | 1.29 | 39.8b | 42.4b | 1.55 | 15.3b |
| NPK | 34.4a | 1.73 | 61.1a | 64.2a | 2.34 | 19.7a |

² Values represent the mean of three replications, n = 60 (20×3).

^y Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

^x Ratio of no. of mature green grain and whole plant fresh weight to non-fertilizer plot.

Table 6. Element concentrations of fertilizer in each experimental plot (1998).

| Experimental plot | Element concentration (%) | | | | |
|-------------------|---------------------------|------|------|------|------|
| | N | P | K | Ca | Mg |
| O | 2.52 | 0.61 | 1.84 | 0.84 | 0.32 |
| N | 3.37 | 0.72 | 1.35 | 1.10 | 0.39 |
| P | 3.42 | 0.90 | 1.64 | 1.02 | 0.38 |
| K | 3.30 | 0.69 | 2.36 | 0.76 | 0.29 |
| NP | 3.44 | 0.81 | 1.78 | 1.02 | 0.34 |
| NK | 3.35 | 0.74 | 2.30 | 0.76 | 0.29 |
| PK | 3.42 | 0.91 | 2.52 | 0.84 | 0.27 |
| NPK | 3.40 | 0.85 | 2.23 | 0.89 | 0.34 |

 Table 7. Effects of three major nutrients on growth and yield in green soybean (1997-9)^z.

| Cultural years | Experimental plot | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------------|---------|----------|----------|--------|----------|---------|--------|
| | O | N | P | K | NP | NK | PK | NPK |
| Main stem length (cm) | | | | | | | | |
| 1997 | 20.6 bc ^y | 23.6 b | 23.9 b | 23.0 b | 28.8 a | 22.0 bc | 23.5 b | 28.6 a |
| 1998 | 18.4 bc | 22.6 b | 23.2 a | 19.1 bc | 25.2 a | 19.9 bc | 25.0 a | 25.5 a |
| 1999 | 18.6 bcd | 22.8 bc | 19.7 bcd | 19.8 bcd | 24.9 b | 22.2 bc | 21.3 bc | 28.2 a |
| No. of mature green bean | | | | | | | | |
| 1997 | 14.0 bc | 20.1 b | 31.8 a | 14.2 bc | 32.7 a | 14.1 bc | 24.4 b | 34.5 a |
| 1998 | 11.2 b | 8.6 b | 21.2 a | 22.5 a | 20.8 a | 6.7 b | 17.9 a | 26.3 a |
| 1999 | 19.9 b | 17.3 bc | 29.2 a | 15.8 bc | 30.0 a | 17.1 bc | 25.6 b | 34.4 a |
| Whole fresh weight of green pod (g) | | | | | | | | |
| 1997 | 6.9 bc | 9.3 b | 13.9 a | 6.9 bc | 14.3 a | 7.2 bc | 11.9 b | 17.2 a |
| 1998 | 7.4 bc | 6.6 bc | 13.9 a | 7.1 bc | 17.0 a | 5.2 bc | 15.1 b | 21.5 a |
| 1999 | 17.8 b | 19.2 b | 27.8 a | 14.6 bc | 32.0 a | 14.7 bc | 25.0 a | 36.4 a |
| Top fresh weight (g) | | | | | | | | |
| 1997 | 13.6 bc | 20.8 b | 29.4 b | 14.6 bc | 33.8 a | 13.0 bc | 24.2 b | 41.6 a |
| 1998 | 12.8 bc | 13.3 b | 23.8 b | 12.7 bc | 28.7 a | 10.0 bc | 24.4 b | 36.2 a |
| 1999 | 25.9 bc | 27.7 bc | 42.3 b | 22.3 bc | 51.9 a | 31.6 bc | 39.8 b | 61.1 a |
| Whole plant fresh weight (g) | | | | | | | | |
| 1997 | 15.2 bcd | 22.5 bc | 32.0 b | 16.4 bc | 37.1 a | 14.4 bcd | 26.6 b | 45.0 a |
| 1998 | 14.1 bc | 14.6 bc | 26.4 b | 14.3 bc | 31.6 a | 11.2 bc | 27.3 b | 39.5 a |
| 1999 | 27.4 bc | 29.0 bc | 44.8 a | 23.6 bc | 54.8 a | 33.0 bc | 42.4 b | 64.2 a |

^z Values represent the mean of three replications, n=60 (20×3).

^y Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

化学肥料 3 要素の連続施用が連作エダマメの生育および収量に及ぼす影響

葉の生体重では、NKとNPK、根生体重では、P、N、P、PKおよびNPKと他施用組み合わせ間それぞれに有意差がみられた。植物全体の生体重では、無施用に対し、N、PとNPK組み合わせ施用が2.3倍以上となり、K施用では0.9倍と低かった。これらの結果は、P無施用よりもP単独または、PとN、K要素組み合わせ施用により茎葉の成長が促進され、P要素が成長に対し有効に働いたものと考えられる。中林ら⁸⁾はエダマメの茎・葉はPの施用によってNなど無機成分の吸収が促され、成長がより充実すること、箱崎⁹⁾はインゲンマメの茎葉や若莢の成長はP単独またはPとN、K組み合わせ施用要素で促進され、御子柴ら¹⁰⁾はリン酸の要素施用により、エダマメの草丈や主茎節数が増加し、分枝の発育が促進され、根系の発達がよくなることを見出しており、これらと本実験結果とは一致している。

化学肥料 3 要素連続施用が連作エダマメの莢・子実の成長に及ぼす影響は、1粒莢、2粒莢および3粒莢を含めた、着莢総数では、N、PとNPK要素組み合わせ施用により増加し、N、KとNKのP無施用で減少し、施用要素の違いに有意差がみられた。一株総生体重では、無施用に対し、N、PとNPK要素組み合わせ施用が2.0倍以上に増加し、K施用が0.8倍で最も減少し、施用要素の違いに有意差がみられた。これまで述べたように、莢および子実の成長に対し、P施用要素が有効に作用し、増加・促進した結果によるものと考えられる。このことについて栗山¹¹⁾は、窒素の効果が高く、やせ土では、収量が劣り、過多であると、草勢が強く分枝数が増えるが着莢が不揃いとなり、空莢や一粒莢が増えると報じている。菅野¹²⁾によれば、窒素濃度の低下は結莢歩合を下げ、子実の生産効率に影響を及ぼし、リン酸は子実の肥大期に有効で、本試験地のような火山灰土壌では、リン酸欠乏が著しく、稔実不良の起こるのを抑えるには窒素施用量の増加によってリン酸の肥効が高まる。箱崎⁹⁾によればインゲンマメの若莢の成長はP単独またはPと他の要素組み合わせ施用により増加し、莢実が増加した。小林ら⁴⁾はリン酸の施肥は施肥量が多いほど収量は増加するとしている。中林ら⁸⁾は1株当たりの子実乾燥重量はPを施用した、その平均値では6.75gで、無施肥の平均値2.73gの約2倍であり、N、P、K施用8.2gで最も重く、次いでP、PK施用の順で、K施用が最も軽く、これらいずれも本試験結果と一致している。

以上のように、エダマメの茎、葉、莢および子実の成長、収量ともに増大したのは24年間連続し、P施用要素により窒素、カリウムなど無機成分の吸収が促進され、エダマメ作物体が大きく成長し、しかも本試験の土壌が黒ぼく土¹⁰⁾で、Pの肥効が現れやすかったためと考えられる。ま

たリン肥料として与えた過リン酸石灰は SO_3 とCaOを含有¹³⁾(SO_3 27.5%, CaO29.4%)しており、SとCaを多く吸収するエダマメ⁸⁾に向いており、エダマメ栽培には、不可欠で重要な化学肥料、無機成分要素であることが示唆された。

摘 要

本研究は化学肥料 3 要素の連続施用が連作エダマメの生育および収量に及ぼす影響を明らかにする目的では場実験を行ったものである。葉および茎の成長はリン酸施用により増進したが、カリウム施用および無施用では劣った。着莢および子実の成長はリン酸施用により増進したが、カリウムのみ施用では劣った。1株生体総重量は無施用に対し、窒素とリン酸、窒素とリン酸とカリウム要素組み合わせ施用が2倍以上となったが、カリウムのみ施用は0.8倍と低かった。エダマメの莢および子実の増収には、過リン酸石灰の施用が不可欠であることが示唆された。

謝辞 本研究は学生の植物生産実習として長年にわたり、維持・管理されてきたものであり、担当されてきた諸先生方に対し深く感謝を申し上げます。本報告における生育・収穫調査は園芸生理生態学研究室卒業生一同の協力によるものであり、また、本研究の機会を与えてくださった「総合研究」責任者、江崎 要 教授らに対し心から御礼申し上げます。

本研究は明治大学科学技術研究所総合研究の一部として行ったものであることを付記する。

引用文献

- 1) 西 貞夫. 他. 1982. 野菜園芸ハンドブック. 養賢堂. p: 672-678.
- 2) 清水 茂. 他. 1977. 野菜園芸大事典. 養賢堂. p: 1002-1006.
- 3) 御子柴 公人. 他. 1975. 農業技術大系 作物編 6. 日本人とダイズ. 養賢堂. p: 127-129.
- 4) 小林 卓史・折坂 光巨・宮下慶一郎・千葉 泰弘. 1989. エダマメの肥培管理技術. 第二報. 施肥・土壌管理と品質・収量. 東北農業研究. 42: 281-282.
- 5) 菊池 利行・畠山 貞雄. 1988. 岩手県北におけるエダマメ栽培法. 第2報. エダマメに対する窒素施用効果. 東北農業研究. 41: 275-276.
- 6) 中林 和重・河野 敬人・村越 久美子・箱崎 美義. 1999. 肥料 3 要素の連続施用がトウモロコシの無機成分に及ぼす影響について. 日本作物学会紀事. 68 巻 別号 1 p: 200.
- 7) 中林 和重・箱崎 美義・村越 久美子・河野 敬人. 1999.

肥料3要素を連続施用したほ場におけるダイズおよびトウモロコシの無機成分の吸収. 明治大学農学部研究報告. 119:33-42.

- 8) 中林 和重・箱崎 美義・小堀 典子・浅井 司. 2001. 肥料三要素の連続施用が大豆の収量および成分に及ぼす影響. 明治大学農学部研究報告. 126:55-66.
- 9) 箱崎 美義. 1993. インゲンマメの生育および若ざやの収量の及ぼす肥料要素の影響. 明治大学農学部研究報告. 96:43-52.
- 10) 江崎 要・中矢 哲郎・高橋 佳孝・柳澤 剛. 2000. ボク土畑地の表土厚さが土中水分の変動に及ぼす影響. 農業土木学会論文集 No. 208. pp:145-157.
- 11) 高井 康雄・早瀬 達郎・熊沢 喜久雄. 1976. 植物栄養肥料大事典. 養賢堂. pp:1132-1134.
- 12) 高井 康雄・早瀬 達郎・熊沢 喜久雄. 1976. 植物栄養肥料大事典. 養賢堂. pp:689-690.
- 13) 竹迫 紘・三宅 亜弥・堀 水保. 2001. 化学肥料の長期連用が黒ボク土壌圃場の土壌化学性に及ぼす影響. 明治大学農学部研究報告. 126:19-39.

総合研究をかえりみて

この一連の研究は、平成9年（1997年）に明治大学科学技術研究所の総合研究に採択され、以後3年間研究を実施した。なお、平成8年（1996年）にはこの総合研究に先だって予備調査を実施した。

この総合研究に参加した研究者は、下記の6名である。

なお、研究室所属の大学院生らも、この研究の遂行に参加した。

| | | |
|-------|--------|------|
| 研究代表者 | 農学部教授 | 江崎 要 |
| 共同研究者 | 農学部教授 | 内藤忠雄 |
| 共同研究者 | 農学部教授 | 箱崎美義 |
| 共同研究者 | 農学部教授 | 山下義幸 |
| 共同研究者 | 農学部教授 | 竹迫 紘 |
| 共同研究者 | 農学部助教授 | 中林和重 |

また、助成を受けた研究費は次の通りである。

| | |
|----------------|-------|
| 平成 8 年（1996年）度 | 30万円 |
| 平成 9 年（1997年）度 | 310万円 |
| 平成10年（1998年）度 | 300万円 |
| 平成11年（1999年）度 | 295万円 |

これらの研究費は、主に研究の遂行に必要なになった各研究室の準備品および消耗品の購入に使用させていただいた。

研究成果は、7編の論文として、学術誌に発表した。

その内容は、肥料三要素の施用と作物の生育・収量に関するもの、肥料三要素の施用と作物の養分吸収に関するもの、リン酸欠乏と特異的発現遺伝子との関連性、肥料三要素の施用と土壌化学性の変化に関するもの、肥料三要素の施用と土壌物理性の変化に関するもの、に大別される。

総合研究として、各研究者は自分の研究分野から、この課題に積極的にアプローチした。研究内容は現代の先端的な研究手法とも言えるDNA技術を駆使した論文から、各試験プロットの土層の硬さに着目して、土木工学的手法である長谷川式土壌貫入計による打撃回数から、施肥の種類別・作物別の影響度合いを解析した論文まで、多彩にわたっている。

土層の硬さに着目した論文によると、エダマメとトウモロコシとの作物の違いが土層の硬さに及ぼす影響については有意差が認められた。しかし施肥の種類別の違いが土層の硬さに及ぼす影響については、違いはあるようだが有意差を認めるまでには至らなかった。試験圃場には全体的にゆるい傾斜があったので、慢性的な土壌侵食の可能性が否定できず、解析を困難した面がある。

総合研究の研究費を受け有意義な研究ができたこと、また科学技術研究所のご支援をいただいたことに対して、感謝致します。